

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO EN LOS CILINDROS DE LA CAJA DE
DESBASTE DEL TREN DE LAMINACION DOS EN LA PLANTA TUTA DE LA EMPRESA
GERDAU DIACO**

EDWIN ARTURO ZARABANDA GONZALEZ

Cód.: 54069246



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
BOYACA
2017**

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO EN LOS CILINDROS DE LA CAJA DE
DESBASTE DEL TREN DE LAMINACION DOS EN LA PLANTA TUTA DE LA EMPRESA
GERDAU DIACO**

EDWIN ARTURO ZARABANDA GONZALEZ
Cód.: 54069246

**Proyecto en la Modalidad de Monografía Presentado para Optar al Título De Ingeniero
Electromecánico**

DIRECTOR:
ING. ORLANDO DIAZ PARRA
Ingeniero Mecánico-Estudios de Maestría en Metalurgia y Ciencias de los Materiales
Docente U.P.T.C

Coordinador Gerdau Diaco Planta Tuta
ING. JUAN CARLOS SAENZ CHAPARRO
Ingeniero de Mejora Tren de Laminación 2

UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
BOYACA
2017

Nota de Aceptación:

Firma del Director

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Duitama, 30 de octubre de 2017

Dedico este trabajo a mi madre, la señora Carmen González, que no midió esfuerzos para que sus hijos tuvieran un estudio de calidad, incluso con todas las dificultades, pero con mucho amor y perseverancia, sin desistir o debilitarse en ningún momento. Gracias a ella comprendí el valor de la familia, del trabajo y del sacrificio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Ing. Orlando Díaz por el apoyo y paciencia en la realización de este trabajo.

A Gerdau Diaco Tuta por su apoyo en la realización de las pruebas en una de sus instalaciones y especialmente a los ingenieros y colaboradores del área de laminación de la empresa que ayudaron a desarrollar este trabajo con un conocimiento profundo sobre el proceso de laminación.

A los ingenieros, profesores, tutores y compañeros de la U.P.T.C. y a todos aquellos que de una u otra forma compartieron su conocimiento conmigo a lo largo de la carrera de Ingeniería Electromecánica.

A Dios y a la Virgen María, apoyo espiritual fundamental en toda mi vida.

A todos los que ayudaron de forma directa e indirecta en la elaboración de este trabajo.

Contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
1. OBJETIVOS	5
1.1. OBJETIVO GENERAL	5
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
2. MARCO REFERENCIAL	6
2.1. MARCO HISTÓRICO	6
2.1.1. Historia del Acero.....	6
2.1.2. Historia del Acero en Colombia	7
2.1.3. Historia de la Laminación	7
2.1.4. Historia de la refrigeración:.....	8
2.2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.2.1. Enfriamiento.....	9
2.2.2. Refrigeración de Cilindros:	11
2.2.3. Desgaste de Cilindros	11
2.3. MARCO CONCEPTUAL	11
2.3.1. Gerdau.....	11
2.3.2. Gerdau Diaco.....	12
2.3.3. Acero	13
2.3.4. Laminación	14
2.3.5. Cajas de laminación.....	15
2.3.6. Cilindros de laminación	17
2.4. ESTADO DEL ARTE.....	19
2.4.1. SOLUCIONES TRADICIONALES	19
2.4.2. Soluciones Modernas	19
3. METODOLOGIA	21
3.1. TIPO DE INVESTIGACION	21
3.2. POBLACION OBJETIVO Y MUESTRA	21

3.3.	MÉTODO	21
3.4.	TÉCNICAS.....	21
3.4.1.	VARIABLES.....	21
4.	CONDICIONES INICIALES	22
4.1.	REQUERIMIENTOS TÉCNICOS.....	22
4.2.	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO GERDAU DIACO PLANTA TUTA	22
4.2.1.	Tratamiento de Agua	22
4.2.2.	Torre de enfriamiento.....	22
4.2.3.	Bombas.....	23
4.2.4.	Tubería de llegada a la caja de Desbaste.....	23
4.2.5.	Distribución de agua en la caja y flautas de enfriamiento.....	25
4.3.	TOMA DE DATOS	27
4.3.1.	Caja de Desbaste.....	27
4.3.2.	Condiciones de trabajo	28
5.	DESARROLLO DEL DISEÑO	34
5.1.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	34
5.1.1.	Viscosidad Cinemática:.....	35
5.2.	FUERZA DE LAMINACIÓN:	35
5.2.1.	Resistencia a la Deformación:	36
5.2.2.	Arco de Contacto:	41
5.2.3.	Esfuerzos Sobre El Canal	44
5.2.4.	Calculo Del Caudal.....	46
5.2.5.	Remoción del Calor Acumulado Por Canal.....	49
5.2.6.	BOQUILLAS DE REFRIGERACION	51
5.3.	CINTAS DE REFRIGERACION.....	54
5.3.1.	Consideraciones Para el Chorro de Agua:.....	54
5.3.2.	Angulo de Cobertura de la Cinta:.....	55
5.3.3.	Sección Transversal de la Cinta:	55
5.3.4.	Distancia entre la Salida de la Boquilla y la Superficie del Canal:.....	55
5.3.5.	Materiales para la Cinta y Tubo de Entrada para la Refrigeración:	55

5.3.6.	Tubo de Entrada de Refrigeración (Sch40):	55
5.3.7.	Diseño Esquemático de la Cinta de Refrigeración:	56
5.4.	CARACTERISTICAS DEL AGUA DE REFRIGERACION	56
5.4.1.	Efectos Nocivos de las Sales y del aceite en las cintas:.....	57
5.5.	ANALISIS DE LOS DATOS	57
6.	RECURSOS USADOS	60
6.1.	RECURSOS FISICOS.....	60
6.1.1.	Talento Humano:.....	60
6.2.	RECURSOS FINANCIEROS.....	60
7.	RESULTADOS OBTENIDOS	61
8.	CONCLUSIONES	63
8.1.	OBJETIVOS ESPECIFICOS	63
8.2.	OBJETIVO GENERAL	64
9.	BIBLIOGRAFIA	65
10.	GLOSARIO	67
11.	ANEXOS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Método usado en oriente y China.....	6
Figura 2. Diagrama Hierro-Carbono.....	13
Figura 3. Laminación en caliente.....	15
Figura 4. Laminación en frío: a) Fase 1, b) Fase 2.....	15
Figura 5. Diferentes tipos de laminadores.....	16
Figura 6. Configuraciones compuestas de laminadores.....	16
Figura 7. Partes de un cilindro.....	17
Figura 8. Factores que influyen en el desgaste de los cilindros.....	18
Figura 9. Sistema de Moldes en Seco (DMS, por sus siglas en inglés).....	20
Figura 10. Torre de enfriamiento híbrida.....	20
Figura 11. Bomba 5 LN 22.....	23
Figura 12. Isométrico de la caja de desbaste del Tren 2.....	24
Figura 13. Detalle de conexión tubería Caja de Desbaste Tren 2.....	24
Figura 14. Ubicación manifolds rudimentarios en Caja desbaste.....	25
Figura 15. Manifolds existentes de 6 y 4 salidas.....	25
Figura 16. Unión de las mangueras con las flautas de enfriamiento.....	26
Figura 17. Ultimo diseño de flauta realizado en 2005 para la caja de Desbaste.....	26
Figura 18. Caja de Desbaste Tren 2.....	27
Figura 19. Trazado de las canales de los cilindros de desbaste del Tren2.....	28
Figura 20. Perfil de temperatura bajo condiciones de enfriamiento ideales.....	29
Figura 21. Termopar tipo N usado.....	29
Figura 22. Medidor infrarrojo Raitek 3i2ML3.....	30
Figura 23. Gráfico de Rotación de cilindro vs temperatura con refrigerante.....	31
Figura 24. Gráfico de la rotación del cilindro vs temperatura sin refrigerante.....	31
Figura 25. Temperatura del fondo de los canales con la refrigeración existente.....	32
Figura 26. Transferencia de calor que sufre la barra.....	34
Figura 27. Diagrama de tensiones de laminación.....	35
Figura 28. Curva de la tensión de flujo de un acero con 0,15% de carbono.....	39
Figura 29. Representación geométrica del arco del contacto.....	42
Figura 30. Coeficiente de transmisión de calor por convección (h_c) vs. Presión.....	50
Figura 31. Tipos de Chorro.....	52
Figura 32. Cobertura del canal.....	54
Figura 33. Diseño inicial esquemático de las cintas de enfriamiento.....	56
Figura 34. Espaciamiento entre los chorros de refrigeración.....	57
Figura 35. Curvas de Calor dispersado Vs Distancia de las boquillas.....	58
Figura 36. Nuevo montaje de manifolds y mangueras en la caja de desbaste.....	62
Figura 37. Cintas diseñadas montadas en la caja de desbaste:.....	62
Figura 38. Cintas diseñadas fabricadas.....	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de tubería de la caja de desbaste del Tren laminador 2:	23
Tabla 2. Datos caja de Desbaste:	27
Tabla 3. Temperaturas en el primer canal:	30
Tabla 4. Temperatura en el fondo de cada canal entre los 170° y 190°	32
Tabla 5. Informe de Resultados Calidad Agua Diaco	32
Tabla 6. Nomenclatura de los cilindros Gerdau para largos, propiedades y aplicación:.....	33
Tabla 7. Propiedades de los materiales	35
Tabla 8. Coeficiente para tipo de canal.....	37
Tabla 9. Valor Medio de la Altura h_m (Ecuación (12)):	37
Tabla 10. Coeficiente de Fricción μ (Ecuación (10)):	38
Tabla 11. Factor Geométrico k_e (Ecuación (9)):.....	38
Tabla 12. Resistencia al Flujo σ (Ecuación (14)):	40
Tabla 13. Coeficiente de Plasticidad η (Ecuación (15)):	40
Tabla 14. Velocidad de Deformación ϕ (Ecuación (18)):.....	40
Tabla 15. Tensión de flujo k_f (Ecuación (13)):.....	41
Tabla 16. Resistencia a la Deformación k_w (Ecuación (8)):.....	41
Tabla 17. Arcos de contacto de los pases 1 a 8.....	43
Tabla 18. Área de contacto para cada uno de los pases	44
Tabla 19. Fuerza de laminación en cada pase.....	44
Tabla 20. Esfuerzos para Cilindros de Acero	46
Tabla 21. Esfuerzos para Cilindros de Fundición Nodular.....	46
Tabla 22. Valores del Factor de conductividad térmica del cilindro (K_c):	47
Tabla 23. Caudal medio para los distintos Cilindros desbastadores (Ecuación (29)):	48
Tabla 24. Valores de caudal medio para cilindros de hierro fundido:.....	49
Tabla 25. Valores de caudal medio para cilindros de metal duro y acero rápido:	49
Tabla 26. Presión por velocidad de laminación:	51
Tabla 27. Area de transferencia de calor (Ecuación (34)):.....	51
Tabla 28. Angulo del chorro vs. Factor de impacto por unidad de área:.....	53
Tabla 29. Caudal e impacto de las boquillas para cubrir un ángulo de 60° (por boquilla): .	53
Tabla 30. Tubos de refrigeración vs. Caudal:	55
Tabla 31. Parámetros Obtenidos para el Diseño:	58
Tabla 32. Relación de planos del Diseño de las Cintas de Enfriamiento:.....	59
Tabla 33. Equipos, instalaciones, información y materiales	60
Tabla 34. Recursos Financieros	60
Tabla 35. Inspección visual de canales, antes y después del montaje de las cintas de enfriamiento diseñadas:	61
Tabla 36. Tabla de Dureza Escala Mohs	69
Tabla 37. Relación de Anexos del Trabajo:	72

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE ENFRIAMIENTO EN LOS CILINDROS DE LA
CAJA DE DESBASTE DEL TREN DE LAMINACION DOS EN LA PLANTA TUTA DE
LA EMPRESA GERDAU DIACO**

"El valor de una idea radica en el uso de la misma"

Thomas Alva Edison

RESUMEN

Existe un importante asunto derivado de la laminación en caliente: el excesivo calentamiento de los cilindros laminadores. La obvia solución a este problema es la refrigeración. En la empresa GERDAU DIACO Tuta se ha optado por cambiar el sistema original de enfriamiento de las cajas laminadoras de desbaste por uno más eficiente, pues si bien éste ofrecía cierta disminución en la temperatura, la razón entre capacidad refrigerante y cantidad de agua era muy baja. A pesar de los cambios que se han hecho han mejorado en buena medida el sistema de refrigeración, dichas modificaciones han sido en su mayoría ensayo y error y todavía no se logra reducir y mantener una temperatura optima de enfriamiento en la caja de desbaste del tren laminador 2 de la mencionada planta y de la posible solución que dé óptimos resultados, enfocándose en la llegada de agua a la caja, la forma de distribución de la misma y la cantidad que habrá de aplicarse. Se optó por cambiar la estructura existente, compuesta por un tubo de 2" con flautas que apuntan a todas las canales del cilindro, por una configuración de cintas metálicas con salida de boquillas de cono lleno, con un sistema mucho mejor dirigido, más práctico, con más control y con muchísima menos pérdida de agua.

Palabras clave: Refrigeración. Laminación. Desbaste. Cilindros laminadores.

ABSTRACT

There is an important stuff which derives from the hot rolling: overheating of the laminating rolls. The problem's obvious solution is the refrigeration. In GERDAU DIACO Tuta the workers have opted for change the Rolling mills original cooling System for a more efficient one, then while it System offered some temperature decrease, the ratio between cooling power and water quantity was so low. Although the changes done have largely improved the cooling system, these modifications have been make at trial an error and they still fail to reduce and maintain an optimal working temperature. This project goes about the analysis of the Train 2 roughing mil cooling System current state of the Factory mentioned and the possible solution that gives optimum results, focusing on the water supply, the property distribution thereof and the amount to be applied. In the develop of this study it chose to change the existing structure, which consist of a 2" pipe with flutes pointing to all gutters of the cylinder, for a metal bands configuration with full cone nozzle outputs, with a so much better directed, more practical, high control and less water loss system.

Key words: Cooling. Rolling. Roughing. Lamination rolls.

INTRODUCCIÓN

Cualquier material expuesto a fuertes temperaturas experimenta grandes esfuerzos en su estructura, además de cambios en sus características físicas y, en algunos casos, químicas. Una buena refrigeración es un garante para que dicho material opere bajo mejores condiciones, alargando su vida útil, optimizando rendimiento y funcionamiento y reduciendo, por ende, costos tanto de materiales como de mantenimiento.

La laminación en caliente es el proceso más extendido y significativo en la transformación de los metales por conformado, tanto por facilidad, costos y mantenimiento como por variedad y cantidad de productos elaborados. Cada pieza en una máquina laminadora tiene un papel fundamental en el proceso pero las más relevantes son las que entran en contacto directo con la palanquilla, es decir, los cilindros. Es por eso que en las últimas décadas ha habido una tendencia creciente hacia la conservación y prolongación de su vida útil, teniendo en cuenta tanto los materiales de los cuales son hechos como el cuidado y el mantenimiento a los que son sometidos.

Uno de los procesos que más se ha usado en el mantenimiento es la refrigeración. En la laminación en caliente como tal es un ámbito primordial ya que de ello depende la continuidad en el proceso, la calidad de los productos y los bajos costos de fabricación. Con el fin de apoyar esta meta se identificó que uno de los problemas en el proceso de laminación de la planta Gerdau Diaco Tuta es la deficiencia en la refrigeración de los cilindros laminadores de la caja 1 de desbaste del tren número dos.

Si bien en las cajas laminadoras de esta empresa existe un mecanismo para mantener los cilindros a una temperatura baja, éste no cuenta con las características que permitan obtener un óptimo enfriamiento. De ahí parte el problema, el cuál será la base para el desarrollo de este trabajo.

¿Cómo optimizar el sistema de enfriamiento de la caja 1 de desbaste del tren de laminación 2 de la planta GERDAU DIACO TUTA, tanto para alargar la vida útil de los cilindros como para reducir tiempos de mantenimiento o cambio de los mismos, además de los costos que acarreen dichas acciones?

Actualmente se están haciendo paradas por cambio de cilindros en la caja de desbaste del Tren Laminador Dos cada 8.500 toneladas. El costo en tiempo de una parada por cambio de cilindros es de 16 a 20 horas, lo que implica hasta 10 días sin producción anual (únicamente por cambio de cilindros). Estos cilindros laminadores sufren extremos esfuerzos cíclicos mecánicos y térmicos mientras trabajan, lo que degenera en desgaste superficial, pérdida de dureza, deformaciones y excesivas grietas. Los cambios drásticos de temperatura van desde una media de 70°C antes de entrar la palanquilla hasta los 600°C a la salida de ésta, los cuales también producen fatiga por diferenciales térmicas tanto en el exterior como en el interior de los cilindros.

Una reducción en los tiempos muertos por paradas en las cajas laminadoras no sólo aumentaría la producción sino que también reduciría los costos de la misma. Esto se vería reflejado en el aumento de las ganancias de la empresa que, por ende, generará bienestar tanto a los colaboradores directos como a indirectos y a terceros y, obviamente, a sus familias. Además, un bajo precio en los productos los haría mucho más competitivos en mercados nacionales e internacionales, mejorando la economía de la región, posicionándola y dándole reconocimiento. Observando los costos que se pueden ahorrar se justifica completamente tratar de optimizar no solo la refrigeración sino también otras variables observadas. Sin embargo, el presente trabajo sólo se ocupa en tratar de mejorar el sistema de enfriamiento de la caja de desbaste mencionada.

Resumiendo: bajos costos, más garantías, bienestar de los trabajadores directos e indirectos, bienestar social, reconocimiento y posicionamiento global.

Cabe anotar que se procuró que tanto GERDAU como la universidad y el ingeniero en formación se beneficiaran mutuamente de manera provechosa, satisfactoria y conveniente, aportando una eficiente solución o mejora a la planta, dejando el nombre de la institución, la facultad, la carrera y del autor en alto y fortaleciendo los vínculos para dejar abiertas las puertas a futuros proyectos.

Finalmente, y no menos importante, se busca que el sector privado conozca el trabajo de los Ingenieros Electromecánicos y que la profesión se destaque por su compromiso en el desarrollo, responsabilidad y cumplimiento de su labor, demostrando su competencia e integridad en el ámbito profesional.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

- Optimizar el sistema de refrigeración de la caja 1 de desbaste del tren laminador 2 de la empresa GERDAU DIACO TUTA mediante el mejoramiento y/o rediseño de las flautas y boquillas aspersoras, la correcta distribución de las mismas y el control en la llegada de agua.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar el estado actual de la refrigeración de dicha caja para escoger la mejor opción de optimización.
- Diseñar un sistema, en base al análisis inicial, que optimice la refrigeración de los cilindros laminadores de la caja mencionada.
- Evaluar el sistema diseñado para verificar si cumple con los estándares de la empresa, los requerimientos de la universidad y si es viable técnica y económicamente.

2. MARCO REFERENCIAL

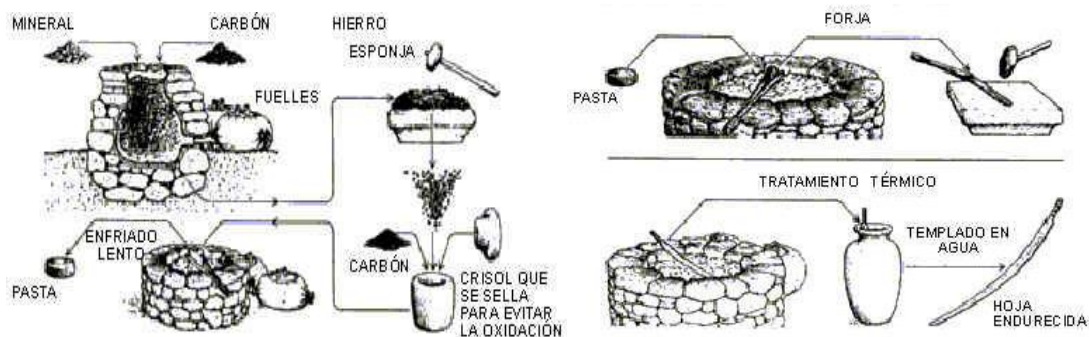
2.1. MARCO HISTÓRICO

2.1.1. Historia del Acero

El acero es básicamente una aleación de hierro con un porcentaje de carbono de entre 0.03% y 2,14% que le proporciona mayor resistencia y dureza. También puede contener otros materiales que le aportan propiedades específicas. Si el porcentaje de carbono es mayor al mencionado la aleación se convierte en una fundición, material más frágil y muchísimo menos maleable que el acero.

Los primeros indicios muestran que ya se usaba el hierro en Egipto cerca del 3000 A.C. Se sabe que en Grecia, en India, en lo que ahora es Sri Lanka y en China se usaban métodos un tanto complejos para producir un material que se acerca más al hierro forjado que al acero (Figura 1). Este metal contenía trazas de escoria y de otros metales en porcentajes de hasta el 3%. Ocasionalmente se producía acero auténtico por accidente.

Figura 1. Método usado en oriente y China



Fuente: <http://www.archdaily.co/co/02-44191/historia-del-acero>

Cerca del siglo IX en medio oriente se empezó a emplear el horno de crisol. En la edad media las técnicas de producir hierro y acero eran conocidas por muy pocos y se mantenían en secreto. A partir del siglo XIV los hornos aumentaron de tamaño y el método evoluciono hacia los altos hornos.

A mediados del siglo XVI el relojero británico Benjamin Huntsman redescubrió la técnica india del acero al crisol. Este método se siguió usando por encima de otros procesos por la homogeneidad y calidad del metal obtenido hasta principios del siglo XX cuando se inventó el horno eléctrico.

En 1856 el ingeniero Henry Bessemer desarrollo un proceso en el cual el aire oxida las impurezas al atravesar el metal caliente haciendo reaccionar el oxígeno con el silicio, el azufre, el carbono, el fósforo y dado que la oxidación del silicio es altamente exotérmica se necesita mucho menos combustible para el proceso.

A comienzos del siglo XX, el francés Paul Herault usó la electricidad para fundir chatarra. Si bien en 1878 Siemens también había usado electricidad para calentar el horno, el método de Herault es más eficiente y se ha mantenido vigente hasta ahora.

En 1948 se desarrolló el método L-D en Austria, el cual usa oxígeno puro en vez de aire para refinar el acero. Dos años más tarde se creó la colada continua. Estos dos métodos son los más usados actualmente en la elaboración del hierro, sin dejar a un lado el proceso del alto horno para obtener acero a partir del mineral de hierro.

Si bien los métodos son los mismos de hace siglos, se han hecho avances en cuanto a la técnica que han mejorado en gran medida la calidad y las propiedades del acero obtenido, manteniéndolo como uno de los productos más usados en el mundo.

2.1.2. Historia del Acero en Colombia

En Colombia la industria siderúrgica apareció con el descubrimiento de los primeros yacimientos de mineral de hierro en 1923 en Pacho, Cundinamarca. Luego, en 1938, se construyó la Empresa Siderúrgica S.A., conocida después como Siderúrgica de Medellín S.A.

En 1942, se presentó el primer informe documentado sobre los yacimientos de Paz del Río en Boyacá. La hacienda Belencito fue escogida para el montaje de una planta por su cercanía tanto a los yacimientos de mineral como a las ciudades de Sogamoso y Duitama. Allí, en 1954, se inauguró Acerías Paz del Río. En 2007 el Grupo Votorantim de Brasil adquirió el 52% de las acciones de esta siderúrgica.

Metalúrgica de Boyacá se fundó en 1961, más adelante se conocería como Siderúrgica de Boyacá S.A.; en 1968 se funda Armaduras Heliacero; en 1972 se creó Distribuidora de Aceros Colombianos *DIACO LTDA*, que compraba la producción de las Siderúrgicas y a su vez la vendía a los pequeños distribuidores y ferreterías. En 1997 estas empresas se unieron pero se conservó el nombre DIACO como marca. En 2001 Siderúrgica de Boyacá compró a Simesa. Se cambió su razón social por “Grupo Siderúrgico Diaco S.A.” y a partir de 2004 esta siderúrgica se conoce como “Diaco S.A.”. Desde comienzos de 2005, Diaco y Sidelpa hacen parte del Grupo Gerdau, el mayor productor de aceros largos de América.

Estos son algunos ejemplos del progreso que ha tenido el sector siderúrgico en Colombia, creando empresa, generando empleo y contribuyendo al desarrollo del país al impulsar otras actividades de la economía como lo es el transporte y otras industrias y servicios.¹

2.1.3. Historia de la Laminación

La laminación es un proceso de conformación mecánica ejecutado por compresión directa del material al pasar por entre pares de rodillos que giran a la misma velocidad pero en

¹BALLESTEROS, Melissa. MONTOYA, Mateo. Historia del Acero en Colombia {En Línea}, {Agosto 2015} Disponible en <https://macecol.jimdo.com/sector-sider%C3%BArgico-1/historia/>

sentido contrario. Leonardo da Vinci fue quien inventó el primer tren de laminación entre los años 1489 y 1495 probablemente para acuñar monedas de plata u oro. La laminación en caliente del acero inició al final del siglo XVI en Inglaterra, en primer lugar para barras y en el siglo siguiente para placas y chapas. Las primeras patentes de laminación en frío son inglesas, de 1761. Inicialmente el acero era laminado en forma de perfiles, hasta 1930 cuando los productos planos pasaron a ser producidos en mucho mayor volumen extendiéndose por todo el mundo después de la segunda guerra mundial.²

2.1.4. Historia de la refrigeración:

La refrigeración es el proceso de disminución y mantenimiento de la temperatura de un objeto o espacio. En sus comienzos se conseguía por medio del hielo natural y se practicó mucho antes de construirse cualquier máquina térmica. Los romanos utilizaban el hielo de los Apeninos y en la Edad Media caravanas de camellos lo transportaban desde el Líbano a los palacios de los califas en Damasco y Bagdad.

En 1553 Blas Villafranca denotó el término *refrigerar* como el “sentido de lograr y mantener una temperatura inferior a la del ambiente”. En 1607, se descubrió que podía utilizarse una mezcla de agua con sal para congelar el agua. Robert Boyle usó mezclas refrigerantes para sus investigaciones. Antoine Baumé, farmacéutico y catedrático de París, inventó la escala de areómetro en 1760. En 1715, usando una mezcla de nieve y nitrato amónico, Fahrenheit establecía el cero de su termómetro.

La primera aplicación de la refrigeración en la industria fue en las refinerías de petróleo. Sin embargo los sistemas refrigerantes eran de bajo rendimiento y se averiaban con frecuencia. Si bien en un principio la mayoría de la maquinaria se enfriaba con chorros de agua, se dieron cuenta de que la calidad de ésta influía en el funcionamiento eficaz del enfriamiento. Se empezaron a usar otros tipos de refrigerantes como aceites y mezclas, dependiendo de la aplicación, y eso contribuyó a un mejoramiento en la refrigeración, sin embargo el agua se sigue usando como principal refrigerante de máquinas hasta la actualidad.

Aunque han pasado más de dos siglos desde la revolución industrial, el objetivo de un sistema de enfriamiento apropiado sigue teniendo los mismos objetivos: dispersar el exceso de calor y mantener una temperatura apropiada para un funcionamiento correcto de la maquinaria³.

² ALEXANDRE MILANEZ. **Curso de laminação de barras laminadas redondas**. 2006. 156 págs. Universidade Federal do Rio Grande do Sur. Porto Alegre.

³ ENRIQUEZ, Salvador. **Historia de la Refrigeración** {En Línea}, {Diciembre 2015} Disponible en www.monografias.com/trabajos81/historia-refrigeracion/historia-refrigeracion.shtml#ixzz4ld8mGOEV

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Enfriamiento

La temperatura es el reflejo de la cantidad o nivel de energía que posee un cuerpo, ya que el frío propiamente no existe. De esta manera enfriar corresponde a “retirar energía” y no debe entenderse en términos de “producir frío o agregar frío”.

La rama de la física que estudia la cantidad de energía en forma de calor que pasa de un sistema a otro es la *termodinámica*, la cual se utilizó para hacer parte del análisis. Además, también se hizo necesario acudir a la rama de la física llamada *transferencia de calor*, pues también se debió analizar la velocidad a la que la energía se transfiere de la barra al cilindro de laminación.

El calor puede transferirse de tres formas: por conducción, por convección y por radiación. La conducción es la transferencia de calor a través de un objeto sólido. La convección transfiere calor por el intercambio de moléculas frías y calientes. La radiación es la transferencia de calor por radiación electromagnética (generalmente infrarroja).

2.2.1.1. CONDUCCIÓN: Es la única forma de transferencia de calor en los sólidos. Se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esto explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que dice: “*la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado)*”⁴.

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{kA}{x}(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Donde:

- $\frac{Q}{\Delta t}$ es el calor transmitido por unidad de tiempo.
- k es la conductividad térmica.
- A es el área de la superficie de contacto.
- T_1 y T_2 son las temperaturas del foco caliente y el foco frío.
- x es el espesor del material.

2.2.1.2. CONVECCIÓN: Un fluido, sea un líquido o un gas, siempre va a tener cierta cantidad de movimiento, esto hace que se transfiera calor de una parte del fluido a otra. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en un campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a

⁴ https://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor

la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

2.2.1.3. RADIACIÓN: La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por el vacío. La radiación se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas. Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica.

En 1900, el físico alemán Max Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación. La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante.

$$I_{(\nu,T)} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (2)$$

Dónde:

- I , es la cantidad de energía por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido por unidad de frecuencia o longitud de onda (según se especifique), en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}\cdot\text{r}^{-1}$.
- ν , es la frecuencia, en Hz.
- T , es la temperatura del cuerpo negro, en K
- h , es la constante de Planck, en J·s.
- c , es la velocidad de la luz, en m/s
- k , es la constante de Boltzmann, en J/K.

Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite.

2.2.1.4. LEY DE ENFRIAMIENTO DE NEWTON: Fue determinada por Isaac Newton experimentalmente analizando el proceso de enfriamiento. Indica que la velocidad de enfriamiento de un cuerpo cálido en un ambiente más frío T_m , cuya temperatura es T , es proporcional a la diferencia entre la temperatura instantánea del cuerpo y la del ambiente:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -r(T - T_m) \quad (3)$$

Donde r es una constante de proporcionalidad.

Resolviendo esta ecuación se obtiene la *Ley de decaimiento exponencial*:

$$T_{(t)} = T_m + (T_0 - T_m)e^{-rt} \quad (4)$$

Una formulación más precisa del enfriamiento de un cuerpo en un medio necesitaría un análisis del flujo de calor del cuerpo cálido en un medio heterogéneo de temperatura. La aplicabilidad de esta ley simplificada viene determinada por el valor del número de Biot:

$$Bi = \frac{hL}{k} \quad (5)$$

Siendo:

- h , el coeficiente de transferencia de calor en la superficie, en W/m²K, también llamado coeficiente de película.
- L , una longitud característica en m, definida generalmente como el volumen del cuerpo dividido por su superficie externa total.
- k , la conductividad térmica del material del cuerpo, en W/mK.

2.2.2. Refrigeración de Cilindros:

En laminadores con refrigeración eficiente el consumo de cilindros ocurre casi exclusivamente debido al desgaste con pérdida de la forma de los canales. En laminadores con problemas de refrigeración el consumo puede ocurrir debido a la formación de grietas térmicas, que necesitan la retirada excesiva de material del cilindro durante el maquinado, o hasta incluso resultan en quiebre de cilindros con pérdida de tiempo productivo.

2.2.3. Desgaste de Cilindros

Los cilindros para laminación en caliente sufren desgaste o degradación debido a las temperaturas de trabajo así como a los esfuerzos de laminación o por otras condiciones de operación, entre las cuales la más importante es la refrigeración. Los efectos de las tensiones primarias y las condiciones ambientales que pueden limitar la vida, y en algunos casos, causar la falla prematura de los cilindros, son la fricción, el desgaste, la fatiga térmica, la oxidación y la corrosión y las fracturas por fuerzas de impacto

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Gerdau

Gerdau es líder en la venta de aceros largos en América y uno de los principales proveedores de aceros largos especiales del mundo. Posee plantas industriales en 14 países —en América, Europa y Asia—, que suman una capacidad instalada superior a 25 millones de

toneladas de acero por año. Además, es la mayor recicladora de Latinoamérica y, en el mundo, transforma anualmente millones de toneladas de chatarra en acero.

En Colombia cuenta con plantas en Muña, Tocancipá y Tuta; así como plantas que prestan servicio a constructores en Cota, Cartagena, Santa Marta, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira, Medellín, Ibagué, Manizales, Neiva, Montería, Villavicencio Pasto y Tocancipá. Cumple con la Norma Técnica Colombiana definida por ICONTEC, y sus aceros para la construcción civil cumplen con la calidad exigida en la Norma de Sismo resistencia NSR-10.

2.3.2. Gerdau Diaco

La empresa Gerdau Diaco Tuta es una planta semi-integrada que utiliza como materia prima la chatarra de hierro o acero, las ferroaleaciones, el coque y la cal, para la producción de palanquilla en lingotes de 130x130 mm de sección con longitudes que varían de 2,6 a 6 m.

2.3.2.1. ACERIA. La palanquilla es producida cuando en un horno eléctrico se funde la chatarra. Este proceso de fabricación se divide en dos fases: la fase de fusión y la fase de afino. La primera se realiza por medio de tres electrodos que calientan los materiales más allá de los 1.500°C. En la segunda se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de impurezas y elementos indeseables (silicio, magnesio, fósforo etc.).

El acero líquido obtenido se vuelca en una cuchara de colada. Este recipiente hace de cuba de un segundo horno de afino (horno cuchara) en el que se termina de purificar el acero. La cuchara lo lleva sobre una máquina de colada continua en donde se vierte el acero fundido. La artesa lo distribuye en varias líneas, cada una con su molde o lingotera, en donde se enfría de forma controlada para formar las palanquillas.

2.3.2.2. LAMINACIÓN. Mediante un proceso de laminación en caliente, aprox. a 1.100 °C, la palanquilla se transforma en los productos comerciales. Este proceso se lleva a cabo mediante tres etapas: desbaste, tren intermedio y tren y/o bloque acabador.

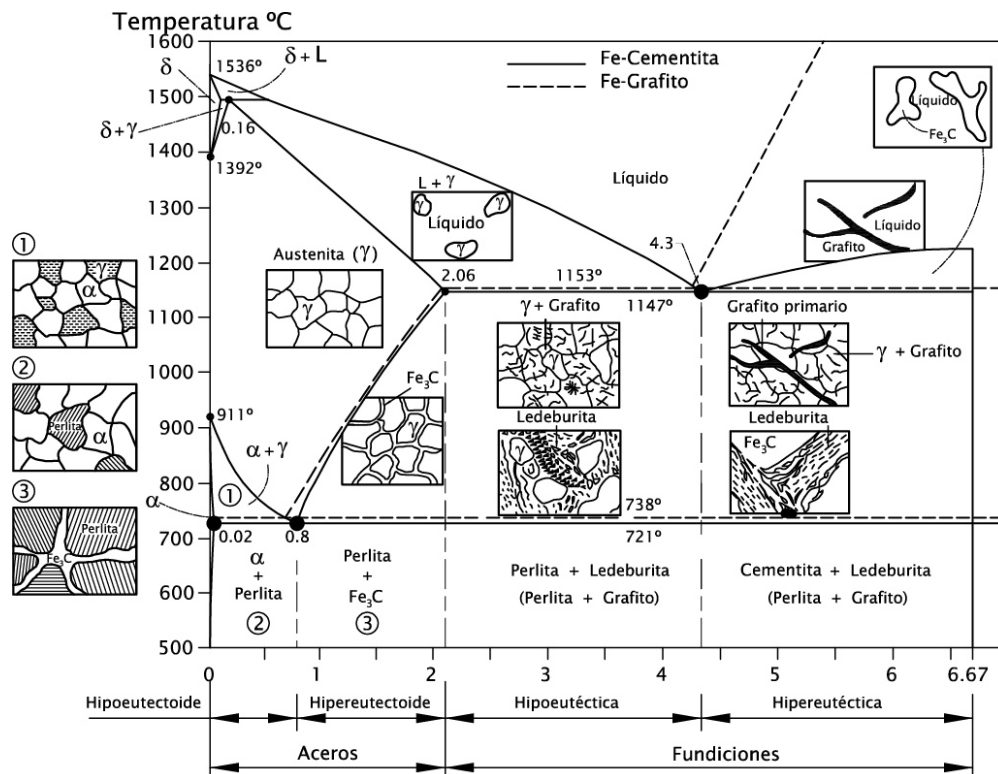
En el desbaste se producen las primeras deformaciones a la palanquilla acondicionándola para los siguientes pases, se eliminan asperezas y buena parte de la calamina (capa de óxido superficial). En el tren intermedio se deforma la barra de acero en diferentes tipos de secciones realizando las reducciones necesarias para ajustar la sección final al tipo de perfil y a las tolerancias deseadas y posteriormente la barra pasa por el tren acabador que imprime la marca de la empresa y el acabado establecido para cada producto.

Al término de la laminación la barra se somete a un enfriamiento rápido con el fin de conseguir una estructura de grano fino. En este proceso se consigue que la zona externa de la barra sea dura y resistente y la zona interior dúctil. Ambos procesos, desbaste y perfilado, los realiza Gerdau Diaco Tuta en dos trenes de laminación, el dos (2) y el tres (3). En el tren número 2 se produce varilla corrugada, redonda-lisa y cuadrada. En el tren número 3 se producen perfiles redondos lisos, cuadrados, platinas y ángulos.

2.3.3. Acero

El acero es una aleación de hierro y carbono, como ya se indicó en la sección 2.1.1, con un porcentaje máximo de carbono de 2,14% (Figura 2), al cual se le agregan diversos elementos de aleación que le confieren propiedades mecánicas específicas para sus diferentes aplicaciones. Las aleaciones del hierro con más de 2.14% de carbono son denominadas *fundiciones de hierro*, las cuáles son mucho más frágiles y no es posible forjarlas sino que deben ser formadas por moldeo.

Figura 2. Diagrama Hierro-Carbono



Fuente: http://www.thyssenkrupp.cl/archivos/DIAGRAMA_DE_FASESweb.png

2.3.3.1. ELEMENTOS DE ALEACIÓN.

- **Carbono:** Es el elemento que tiene más influencia en el comportamiento del acero; al aumentar el porcentaje de carbono, mejora la resistencia mecánica, la templabilidad y disminuye la ductilidad.
- **Boro:** Ejerce una gran influencia sobre la templabilidad del acero, bastando porcentajes muy pequeños, a partir de 0.0004%, para aumentarla notablemente.

- *Azufre*: Aumenta la maquinabilidad, ya que forma inclusiones no metálicas llamadas sulfuros de magnesio, discontinuidades en la matriz metálica que favorecen la formación de viruta corta.
- *Cromo*: Es un gran formador de carburos, aumenta la dureza y la resistencia al desgaste y reduce la ductilidad. Mejora la resistencia a la alta temperatura y a la formación de cascarilla. En cantidades mayores al 12%, hace al acero resistente a la corrosión.
- *Fósforo*: Incrementa la resistencia y reduce la ductilidad de la ferrita. Aumenta la brillantez. En cantidades superiores al 0.004%, disminuye todas las propiedades mecánicas del acero.
- *Molibdeno*: Formador de carburos, reduce el crecimiento del grano, mejora la resistencia al desgaste y la capacidad de conservar la dureza a temperaturas altas.
- *Cobalto*: Aumenta la velocidad crítica y disminuye la templabilidad. Aumenta la dureza y asociado al níquel o al cromo, forman aceros de débil coeficiente de dilatación, cercano al vidrio. Aumenta la velocidad crítica de enfriamiento y en los aceros para trabajo en caliente y rápidos incrementa la disipación de temperatura.
- *Manganeso*: Mejora la resistencia a la tracción y al desgaste, tiene buena influencia en la forja, la soldadura y la profundidad de temple. Facilita el mecanizado.

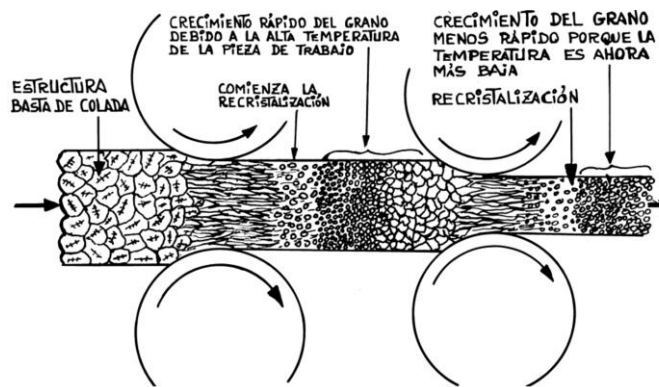
2.3.4. Laminación

Es un proceso de conformación mecánica ejecutado por compresión directa del material al pasar por entre pares de rodillos que giran a la misma velocidad pero en sentido contrario. Con esto se obtiene una deformación plástica, con alteraciones permanentes en la forma y en las propiedades mecánicas sin alteración de la masa ni el volumen. Es por esto que las propiedades del producto dependerán mucho de la calidad (composición química) del acero que se utilice así como de las condiciones (temperatura, velocidad, reducciones, acabado) en el proceso de laminación. Este proceso se puede realizar en frío o en caliente.

2.3.4.1. LAMINACIÓN EN CALIENTE: Aprovecha la ductilidad del acero al aumentar su temperatura. Los hornos para el calentamiento, aunque el objetivo sea llevar las piezas a laminar hasta la temperatura prescrita para ello, varían en su diseño y operación, según se trate de trenes desbastadores o laminadores. Hay dos etapas en la laminación en caliente:

- Calentamiento y laminación desbastadora de los lingotes y petacas obtenidos en la colada en lingotera para transformarlos en palanquillas (blooms) o planchones (slabs).
- Nuevo calentamiento seguido de laminación forjadora y acabadora de los blooms y slabs desbastados para obtener, respectivamente, largos o planos (Figura 3).

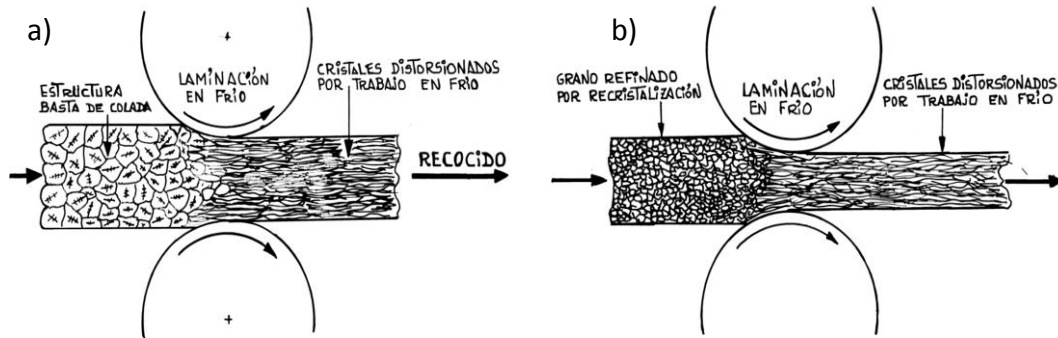
Figura 3. Laminación en caliente



Fuente: Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte IV⁵

2.3.4.2. LAMINACIÓN EN FRÍO: En este proceso se parte de bobinas laminadas en caliente. Los espesores varían, según los tipos de acero, entre 1,5 mm y 8,5 mm. Se reduce normalmente hasta espesores variados, comprendidos entre 0,10 mm y 6 mm (Figura 4).

Figura 4. Laminación en frío: a) Fase 1, b) Fase 2



Fuente: Monografías sobre Tecnología del Acero. Parte IV

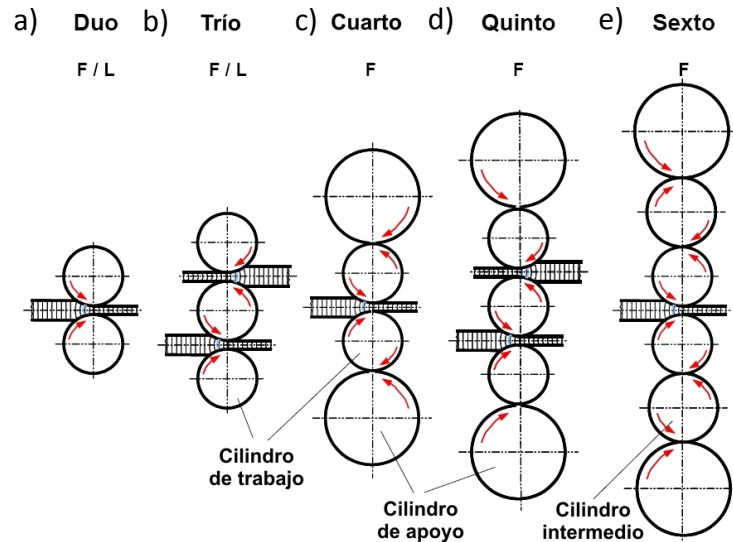
2.3.5. Cajas de laminación

Una caja laminadora consta fundamentalmente de dos cilindros cuyos diámetros van desde 600 hasta 1400 mm, una carcasa o caja para fijar los cilindros y sus componentes y un sistema para proveer la potencia necesaria y controlar la rotación. Las cajas tienen una construcción bastante robusta y rígida, además de motores muy potentes para proveer la fuerza necesaria, que puede alcanzar millares de toneladas.

Se usan distintas disposiciones de cilindros en la laminación. La más simple es constituida por dos cilindros de ejes horizontales colocados verticalmente uno sobre otro. Es llamado laminador dúo y puede o no ser reversible (Figura 5, parte a)). En el laminador trío (Figura 5, parte b)), los cilindros siempre giran en el mismo sentido pero el material puede ser laminado en ambas direcciones al ser alternado entre el cilindro superior y el intermedio y entre el intermedio e inferior.

⁵ ENRIQUEZ, José Luis. TREMP, Enrique. DE ELÍO, Susana. **Laminación**. Madrid, 2010, 116 pág. Pág. 69

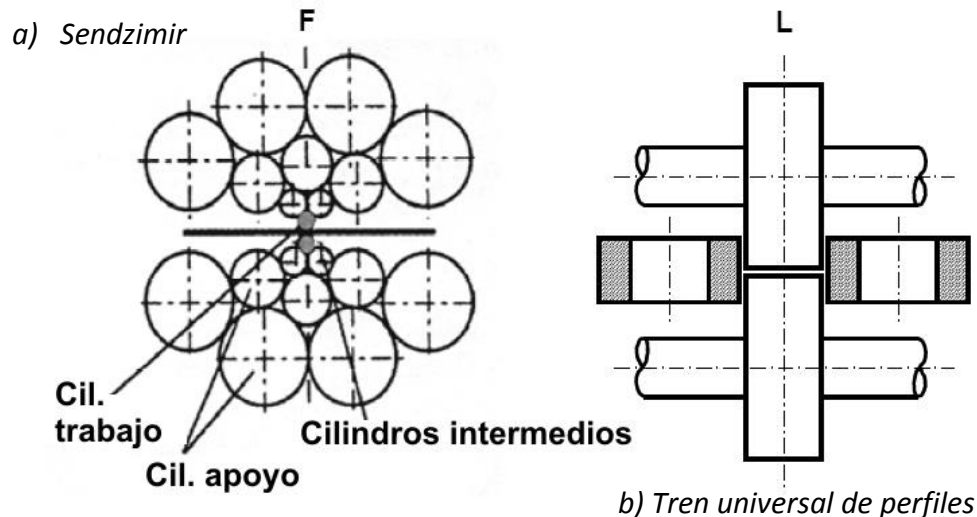
Figura 5. Diferentes tipos de laminadores



Fuente: Descripción básica de los Fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación⁶

A medida que se laminan materiales más delgados se hace necesario usar cilindros de pequeño diámetro. Dichos cilindros son más propensos a flexionarse y deben estar apoyados por cilindros de respaldo (Figura 5, parte c), d) y e)). Estos tipos de laminadores se denominan cuádruplos, quintos y sextos, respectivamente. Pueden ser reversibles o no. Cuando los cilindros de trabajo son muy finos tienden a flectarse tanto en dirección horizontal como en vertical y deben ser apoyados en ambos sentidos. Estos laminadores son llamados Sendzimir o de racimo (Figura 6, parte a)).

Figura 6. Configuraciones compuestas de laminadores



Fuente: Descripción básica de los Fundamentos mecánicos de los cilindros de laminación.

⁶Dr. SCHRÖDER, Karl Heinrich. **Descripción Básica de los Fundamentos Mecánicos de los Cilindros de Laminación**. Birmingham, UK. Ed. Rools. 2003. Pág. 7

Otro laminador muy utilizado es el universal, que dispone de dos pares de cilindros de trabajo, con ejes verticales y horizontales (Figura 6, parte b)). Existen otros tipos más especializados, como el planetario, Mannesmann, de bolas, entre otros, pero no serán mostrados en este trabajo.

2.3.6. Cilindros de laminación

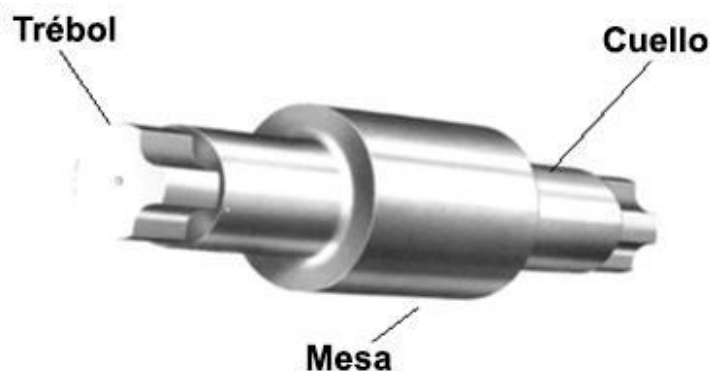
Los cilindros de laminación son las herramientas destinadas a reducir o cambiar las secciones de metales con propiedades plásticas. Por esta razón están hechos de materiales resistentes que soportan grandes esfuerzos tanto térmicos como de tensión para cumplir con condiciones especialmente rigurosas.

2.3.6.1. PROPIEDADES DE LOS CILINDROS. Mientras cumplen sus funciones, los cilindros están expuestos a variados esfuerzos de flexión, desgaste y dilatación por efecto de la temperatura, etc. Las propiedades más importantes de los cilindros son:

- Resistencia a la rotura
- Resistencia al desgaste
- Buen acabado superficial
- Resistencia a la formación de grietas de calor
- Resistencia a la formación de cascarilla (óxidos)

Las partes fundamentales de un cilindro de la laminación son el cuerpo del cilindro y la superficie de contacto, llamada tabla, que está destinada a efectuar la deformación del metal a laminar. El cilindro está apoyado en los cuellos, ubicados lo más cerca posible al cuerpo. A continuación de los cuellos, están los muñones, de diferentes formas, que permiten el acoplamiento al mando que imprime la rotación a los cilindros (Figura 7).

Figura 7. Partes de un cilindro



Fuente: LM-517 Cilindros, Anillos y Guías. Escuela Técnica Gerdau (2007).

2.3.6.2. TIPOS DE CILINDROS

- Cilindros de hierro fundido
- Cilindros de acero fundido
- Cilindros de acero forjado

2.3.6.3. FABRICACION DE CILINDROS DE LAMINACION. En las últimas décadas se han producido numerosos adelantos en la tecnología de la fabricación de los cilindros de laminación con miras a satisfacer las exigencias de calidad de los usuarios. En este aspecto se han desarrollado técnicas tales como:

- Doble colada para cilindros de fierro y acero fundido.
- Tratamiento térmico diferencial para cilindros de acero fundido.
- Tratamiento térmico diferencial para camisas de acero forjado.
- Endurecimiento progresivo por inducción para cilindros forjados.
- Moldeo por rotación para cilindros de fierro fundido y camisas de acero fundido.
- Procedimiento de electroescoria.

Los costos de fundición de cilindros de doble colada son más elevados. Aunque, desde el punto de vista de la calidad, los cilindros de doble colada dan mejores resultados de rendimiento, por lo menos en un 50%, que los cilindros del tipo convencional.⁷

2.3.6.4. FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA DE LOS CILINDROS DE LAMINACIÓN. Sus principales tipos de degradación superficial son el daño por deterioro, por cambios térmicos abruptos y el debido a la oxidación. Estas formas de desgaste se deben a las temperaturas de la laminación, a los esfuerzos a los que están sometidos los cilindros y a las condiciones de operación, entre las cuales la más importante es la refrigeración (Figura 8).

Figura 8. Factores que influyen en el desgaste de los cilindros



Fuente: Autor del proyecto

⁷ Dr. SCHRÖDER, Karl Heinrich. Op cit. Pág. 44

2.4. ESTADO DEL ARTE

El requerimiento total de enfriamiento de los cilindros en las cajas de desbaste tipo TRIO puede variar de acuerdo al proceso, no obstante, se tiene estimado que representa entre un 50 y un 90% de la exigencia de enfriamiento total. Se tiene claro también que no es necesario usar agua refrigerada para el enfriamiento de estas cajas, ya que la temperatura requerida es superior a los 35°C. Es suficiente utilizar agua a temperatura ambiente. Además no se requiere un control estricto de la temperatura de la misma.

2.4.1. SOLUCIONES TRADICIONALES

2.4.1.1. AGUA DESECHADA. Usado hasta hace unos años, esta solución es obsoleta en este momento, no sólo por razones técnicas sino también por disposiciones legales que limitan cada vez más el consumo de agua de fuentes naturales debido a la contaminación termal que ocasiona en el curso del agua.

2.4.1.2. TORRE DE ENFRIAMIENTO. Este sistema se ha empleado durante mucho tiempo, sin embargo los problemas de instalación, unidos a los altos costos de mantenimiento, han llevado a su reemplazo sistemático por refrigeradores de agua industrial de circuito cerrado. Algunos de los problemas que presentan son incrustación, formación de algas, contaminación bacteriana y corrosión ácida y deben enfrentarse con trabajos continuos y costosos de mantenimiento.⁸

2.4.1.3. REFRIGERADOR INDUSTRIAL: Los refrigeradores de agua y las plantas de refrigeración se han perfeccionado como soluciones típicas a los problemas de los sistemas de enfriamiento mencionados. Sin embargo, el uso de compresores de refrigeración requiere un alto consumo de energía, lo que conlleva elevados costos energéticos. Recientemente se propusieron los "sistemas de enfriamiento ambiente" como alternativa para ahorrar energía durante las estaciones frías, sin embargo los refrigeradores industriales deben funcionar con una temperatura de agua que no supere los 15-18° C, lo que hace que en temporadas de altas temperaturas no sea óptimo su funcionamiento.

2.4.2. Soluciones Modernas

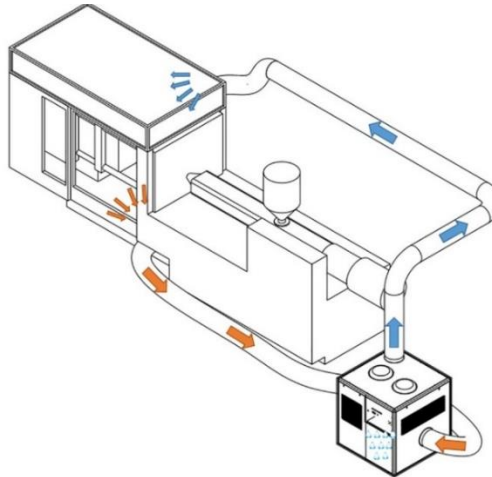
2.4.2.1. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO SECO. Está conformado por una extensa superficie de cobre y aluminio provista de aletas y con ventiladores axiales de alta velocidad de circulación.

Brinda gran confiabilidad y es capaces de mantener la temperatura del agua a unos pocos grados sobre la temperatura ambiente. Trabaja en circuito cerrado, lo que evita el consumo excesivo de agua y los complicados trabajos de mantenimiento característicos de las torres de enfriamiento. Además, su consumo eléctrico representa una octava parte del consumo

⁸ CENTELLES, Francisco. **Enfriamiento de Máquinas y Procesos** {En línea}. Octubre 2016. Disponible en: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5113-Enfriamiento-de-maquinas-y-de-procesos.html>

del refrigerador industrial con compresores de refrigeración. Solo es necesaria una planta de distribución simple y económica, ya que los caños no se aíslan y no se requieren conductos de aire debido a su instalación exterior (Figura 9). Por último la total ausencia de mantenimiento hace que el enfriador seco sea la solución más fiable a largo plazo.

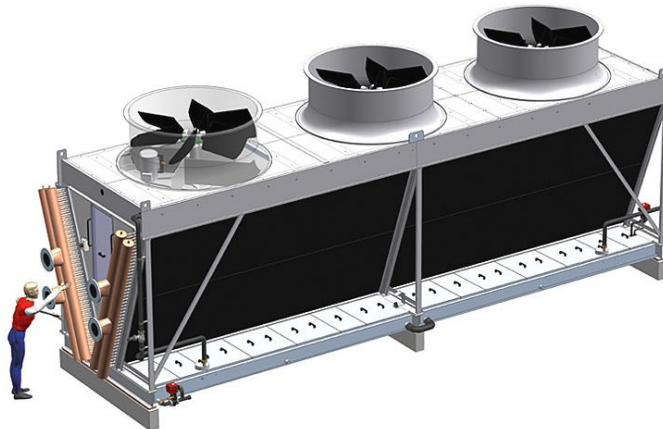
Figura 9. Sistema de Moldes en Seco (DMS, por sus siglas en inglés)



Fuente: <http://img.interempresas.net/fotos/1216906.jpeg>

2.4.2.2. TORRE DE ENFRIAMIENTO HÍBRIDA. Se trata de un refrigerador de proceso ultracompacto gracias al desarrollo tecnológico de intercambiadores de calor tipo placa para refrigeración y al control electrónico por microprocesador (Figura 10). Son fiables y de alta precisión y operan por condensación de agua. Proporcionan un control de temperatura continuo, con un margen de error máximo de 11°C. Pueden ser programados tanto para establecer la temperatura como para el mando de la alarma del refrigerador de proceso, eliminando así por completo los desperdicios. Están equipados con un dispositivo automático de enfriamiento ambiente que hace funcionar el compresor únicamente cuando la temperatura del agua procedente de la planta central es superior a lo establecido.

Figura 10. Torre de enfriamiento híbrida



Fuente: http://flowgasket.com/wp/wp-content/uploads/2013/09/trockenkuehler_01_bild.jpg

3. METODOLOGIA

3.1. TIPO DE INVESTIGACION

Es una investigación aplicada de enfoque cuantitativo, dirigida a analizar y mejorar el sistema de refrigeración existente en la caja No. 1 del tren laminador 2 de Diaco Tuta mediante la toma de datos del estado actual de dicho sistema y el consiguiente diseño/rediseño del mismo. Además permite que los resultados se puedan aplicar en las plantas hermanas de GERDAU, estandarizando el sistema para un mejor control y mantenimiento.

3.2. POBLACION OBJETIVO Y MUESTRA

La población objetivo fue la caja de desbaste No 1 (TREADWELL US 1854597 A) y las cajas afines de las plantas hermanas, llegado el caso en que el proyecto sea óptimo para aplicarlo en dichas fábricas.

La muestra con la que se trabajó fueron los cilindros laminadores de la caja 1 ya mencionada, los cuales estuvieron en continua observación para ver los efectos del calentamiento por las palanquillas y posterior enfriamiento con agua y en base a esto tomaron las decisiones adecuadas en el proyecto.

3.3. MÉTODO

Se usó el método analítico para corregir falencias en el sistema de enfriamiento actual, considerando cada una de las variables principales que hacen parte del proceso y fundamentando las decisiones en los conocimientos técnicos adquiridos.

3.4. TÉCNICAS

Se usaron técnicas de obtención de datos por observación y comparación de las variables.

3.4.1. VARIABLES

- Temperatura de la palanquilla (Cuantitativa).
- Temperatura del cilindro (Cuantitativa).
- Temperatura del agua (Cuantitativa).
- Dureza del cilindro (Cuantitativa).
- Angulo de aspersión (Cuantitativa).
- Área de aspersión (Cuantitativa).
- Geometría de las cintas y de las boquillas (Cuantitativa).
- Presión del agua (Cuantitativa).
- Caudal del agua (Cuantitativa).
- Calidad del agua (Cuantitativa).
- Geometría de la tubería (Cuantitativa).

4. CONDICIONES INICIALES

4.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

- El agua debe tener contacto mínimo con la barra de laminación, sin embargo debe limpiar el canal de partículas metálicas y residuos.
- Se debe disminuir, y si es posible eliminar, el vapor que produce el agua de enfriamiento.
- La refrigeración debe ubicarse en el lado de la salida de la barra.
- Los ductos o tuberías de la refrigeración deben ser del mayor diámetro posible sin pérdida excesiva de presión.
- Durante la laminación las válvulas siempre deben estar completamente abiertas.

4.2. SISTEMA DE ENFRIAMIENTO GERDAU DIACO PLANTA TUTA

La planta Tuta dispone principalmente de los siguientes componentes para el enfriamiento del proceso:

4.2.1. Tratamiento de Agua

Un circuito cerrado de aguas que es alimentado por el líquido de uno de los afluentes del río Chicamocha y por un sistema de recolección de aguas lluvias. Se usa no sólo para el enfriamiento de los procesos sino para uso de limpieza general. Está conformado por decantadores, sedimentadores, filtros y sumideros para las partículas grandes, un tanque para tratamiento de fangos y una cámara para la separación de partículas ferrosas. Este sistema ayudó a reducir el consumo de agua en un 13% a partir de 2004 y año tras año, con base en las mejoras que se le han hecho ese porcentaje ha aumentado, gracias al compromiso medioambiental de Gerdau con el desarrollo sostenible de la región.

4.2.2. Torre de enfriamiento

Es una estructura de 25 m de alto que usa el sistema de tiro inducido, el cuál succiona el aire a través de la torre por medio de un ventilador ubicado en la parte superior de la misma. El agua al ser utilizada se calienta después de pasar por la acería, por la máquina de colada continua y por los trenes de laminación, luego es enviada a la torre donde el 99% se vuelve a reaprovechar en los procesos industriales y se evapora alrededor del 1%, sin contar con las pérdidas durante el proceso de enfriamiento.

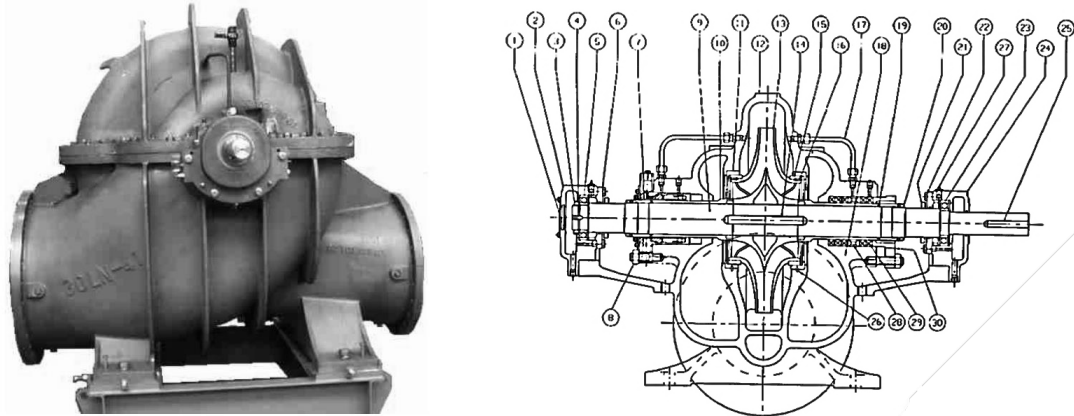
El sistema que se emplea permite recircular el agua en varias ocasiones a través de tuberías logrando que la cantidad de agua tomada de las fuentes sea muy poca, además, el agua de enfriamiento se somete a los tratamientos físicos ya mencionados y por medio de sustancias y aditivos químicos se neutralizan los componentes no eliminados que alteran la calidad del agua, permitiendo de esta manera el control de los impactos ambientales.

4.2.3. Bombas

El sistema se compone de varias bombas por cada sección de la planta. La que da la potencia al agua para el tren laminador 2 tiene las siguientes características:

BOMBA 5 LN 22 flowserve, 450 m³ por hora, 180-200 psi de trabajo, motor de 300 Hp- 1800 rpm.

Figura 11. Bomba 5 LN 22



Fuente: Manual de instrucciones de instalación, operación y mantenimiento para el usuario

4.2.4. Tubería de llegada a la caja de Desbaste

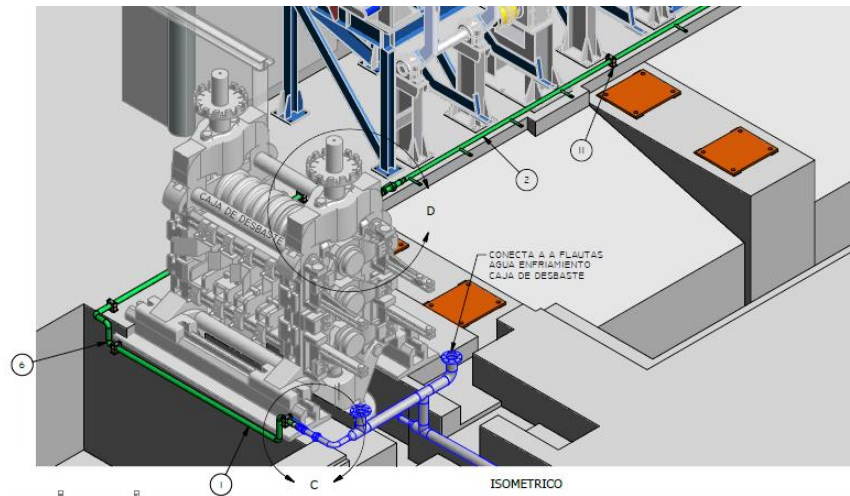
El sistema de refrigeración cuenta con dos refrigerantes los cuales son agua y aire, el diámetro del ducto de aire es de 3/4'' y el diámetro del ducto de agua es de 1-1/2''. En la siguiente tabla se muestran la posición, la cantidad y la descripción de materiales existentes de tubería que alimenta a la caja de desbaste analizada en este trabajo. Además, en la Figura 12 y en la Figura 13 se muestra cómo va ubicada la tubería.

Tabla 1. Tabla de tubería de la caja de desbaste del Tren laminador 2:

POS	CANT	DESCRIPCION
1	2	Tubo Acero – Carbón Φ 2" Sch. 40 x 6 M
2	1.5	Tubo Acero – Carbón Φ 1 1/2" Sch. 40 x 6 M
3	3	Válvula de Bola Φ 3" ROSCADA INOXIDABLE
4	1	Reducción Copa Concéntrica Φ 4" - 2" Acero – Carbón Sch. 40
5	1	Reducción Copa Concéntrica Φ 2" - 1 1/2" Acero – Carbón Sch. 40
6	10	Codo Acero – Carbón Φ 2" Sch. 40
7	1	Tee Acero – Carbón Φ 2" Sch. 40
8	3	Unión Universal Inoxidable. Φ 2"
9	9	Niple Roscado Acero – Carbón Φ 2" Sch. 40 Long. 150 mm
10	6	Soporte Bipartido para Tubo Φ 2" con Tornillos
11	2	Soporte Bipartido para Tubo Φ 1 1/2" con Tornillos
12	1	Tapón O Cap. Acero – Carbón Φ 1 1/2" Sch. 40
13	8	Boquilla en Tubo Φ 3/4" Acero – Carbón Soldado a Flauta

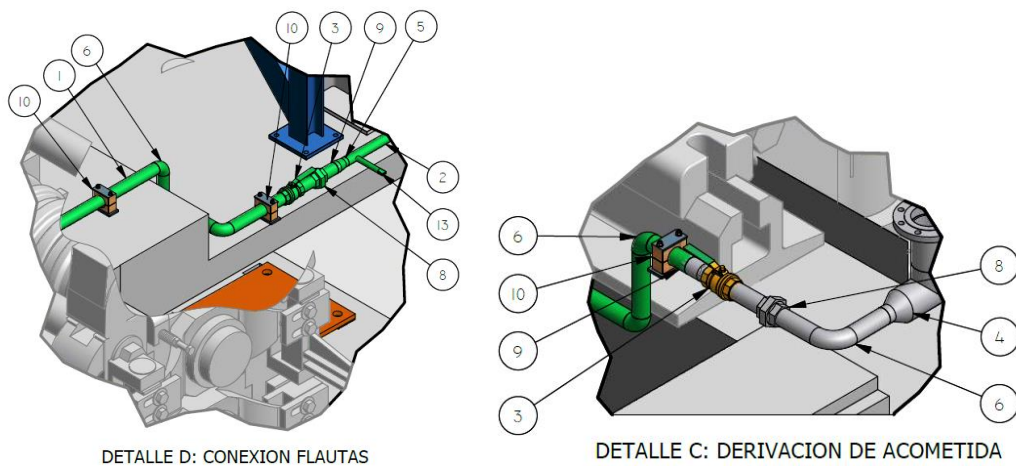
Fuente: Autor del proyecto

Figura 12. Isométrico de la caja de desbaste del Tren 2



Fuente: Plano DTU_T2_AGUA A C1_RAMP.dwg (Anexo 2)

Figura 13. Detalle de conexión tubería Caja de Desbaste Tren 2



Fuente: Plano DTU_T2_AGUA A C1_RAMP.dwg (Anexo 2)

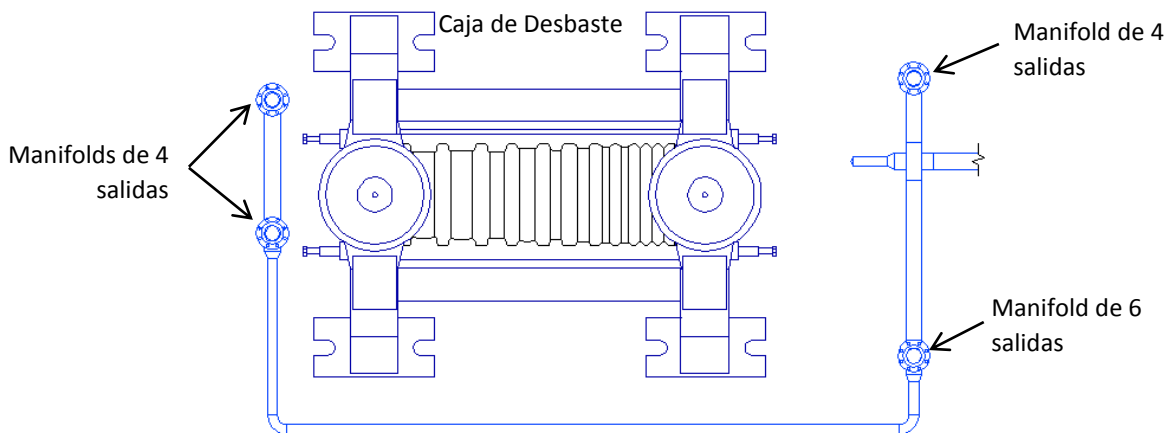
El conjunto de tuberías que llega a esta caja de desbaste cuenta con 7 Venturi, la longitud de cada uno es de 26 cm. En cada uno, 2,5 cm en cada extremo son para cuellos, los cuales acoplan con el siguiente Venturi. El diámetro exterior es de 9,8 cm en los extremos, el diámetro externo en el resto de la sección es de 7,5 cm. El diámetro interno es de 6.1 cm, el ángulo de inclinación de las paredes internas es de 7° formando un cuello con un diámetro de 3 cm; el largo total del cuello es de 2 cm.

El material de los Venturi es acero AISI D3. Es un acero para herramientas con alto contenido de carbono y cromo, con gran resistencia al desgaste, alta dureza superficial, gran estabilidad dimensional, gran resistencia a la compresión y alta templabilidad. La dureza de este acero es de 54 – 56 HRC, sin embargo el acero utilizado en los Venturi de este sistema pierde su dureza proporcionalmente al calentamiento que sufra, es decir que entre más se calienten su dureza disminuirá.

4.2.5. Distribución de agua en la caja y flautas de enfriamiento

La caja cuenta con cuatro manifolds rudimentarios de 2" de diámetro, ubicados a los lados de la caja. Tres de ellos tienen 4 salidas y el otro posee 6. Su distribución se muestra en la Figura 14. De cada manifold salen tubos de caucho de 1-1/2" de diámetro, de los cuáles algunos están acoplados con agarraderas y otros con alambre, pues a medida que tienen fisuras o rasgaduras los colaboradores los recortan para que no haya fugas excesivas de agua.

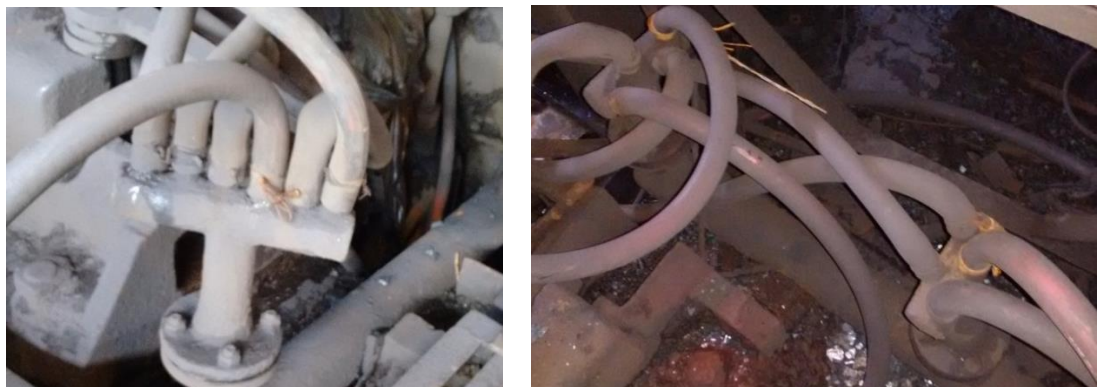
Figura 14. Ubicación manifolds rudimentarios en Caja desbaste



Fuente: Autor del proyecto

Las uniones son muy poco funcionales, tanto en la salida de los manifolds como en la llegada a las flautas que distribuyen el agua (Figura 15). Hay muchas bifurcaciones y ningún control ni de presión ni de flujo. El desperdicio de agua es excesivo y no se cumple a cabalidad la función de enfriamiento.

Figura 15. Manifolds existentes de 6 y 4 salidas



Fuente: Autor del proyecto

Las flautas para la distribución en el sistema de enfriamiento han sido cambiadas gradualmente para “acomodarse” a las necesidades de enfriamiento y calidad de agua, como se puede observar en la Figura 16. Las existentes hasta el estudio y desarrollo de este

trabajo presentan grandes falencias: abundante desperdicio de agua, poco direccionamiento de la misma (lo que hace que entre en contacto con la barra más de lo debido), enorme pérdida de presión, cambio constante por corrosión, entre otras.

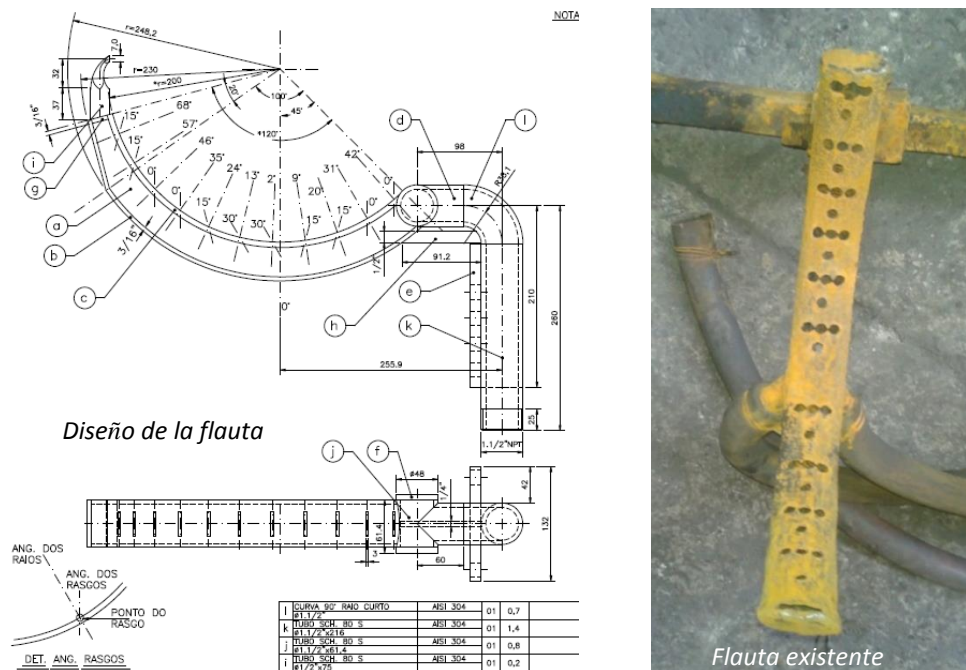
Figura 16. Unión de las mangueras con las flautas de enfriamiento



Fuente: Autor del proyecto

Es notable observar que las flautas tienen arcos de longitud variable y un número no determinado de agujeros. La cantidad de los mismos y su posición sobre las flautas son determinados de manera arbitraria por el colaborador encargado según su estimación (Figura 17). En muchos casos se presentan caídas de presión por diferencias entre las secciones equivalentes de entrada y salida de agua de las cintas. Además, estas diferencias en las secciones o áreas equivalentes generan el llenado incompleto de las flautas en detrimento del aprovechamiento de la totalidad del arco de refrigeración y perjudicando el enfriamiento completo de los canales de laminación.

Figura 17. Ultimo diseño de flauta realizado en 2005 para la caja de Desbaste



Fuente: Archivos Gerdau Diaco Tuta

Aparte de todo, el posicionamiento de algunas flautas no permite que el agua alcance la parte más próxima a la salida de la barra. Este es el punto más crítico en refrigeración pues se trata del lugar en donde la temperatura es más alta, lo que con una refrigeración deficiente facilita la transmisión de calor por conducción al interior del cilindro.

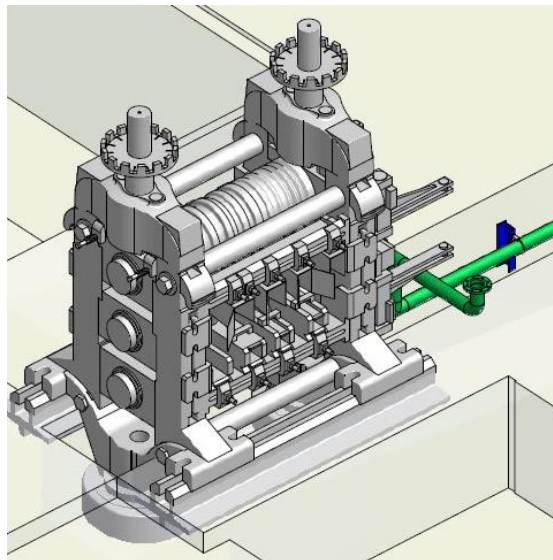
4.3. TOMA DE DATOS

Se tomaron y obtuvieron datos de la calidad del agua, dureza de los cilindros, duración de los mismos, temperatura de trabajo de la máquina, estado actual del mecanismo de refrigeración existente, cantidad y tiempo de paradas (programadas y no programadas) con el fin de tener valores de referencia para optimizar las variables necesarias y comparar al final si el diseño es rentable, confiable y aceptable. A continuación se muestra la información obtenida.

4.3.1. Caja de Desbaste

Es una caja Trio, de referencia TREADWELL US 1854597 A (Figura 18). Se ha acondicionado para los requerimientos de Gerdau Diaco Tuta. Las características que se indican a continuación son las primordiales para el desarrollo del proyecto (Tabla 2):

Figura 18. Caja de Desbaste Tren 2



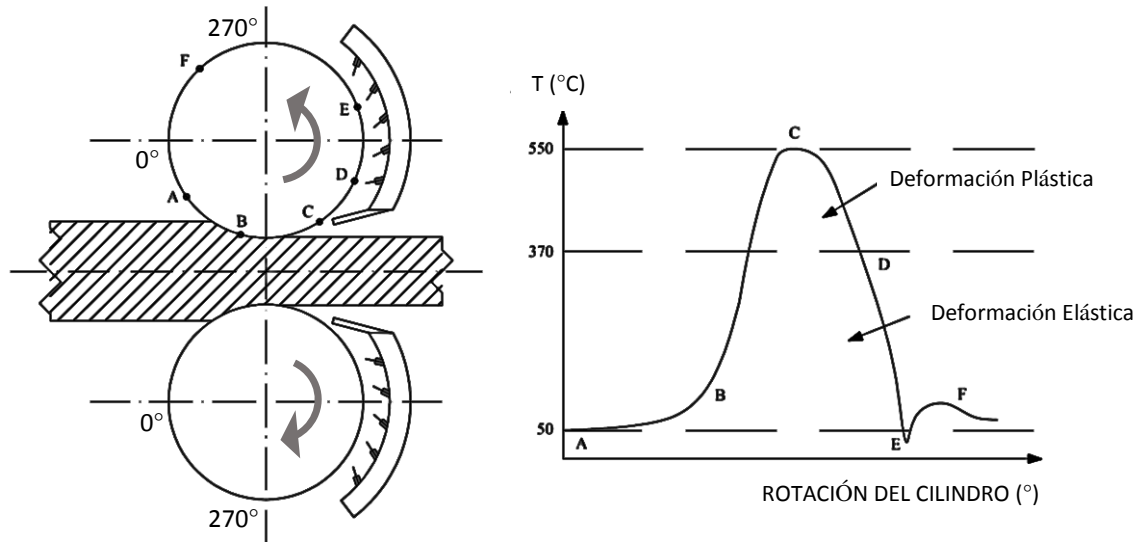
Fuente: Autor del proyecto

Tabla 2. Datos caja de Desbaste:

Descripción	Cantidad	Unidades
Dimensiones palanquilla	130x130	mm
Longitud palanquilla	3 a 6	m
Peso de la palanquilla	396 a 798	Kg
Barras laminadas	8500	Ton/mes
Número de ejes	3	Unidades

barra; la temperatura media del cuerpo del cilindro no aumenta con el tiempo. Con una refrigeración adecuada la cara del canal es enfriada en forma rápida y constante hasta alcanzar la temperatura “al aire”, que se tiene sólo un pequeño incremento cada vez que pasa una barra.

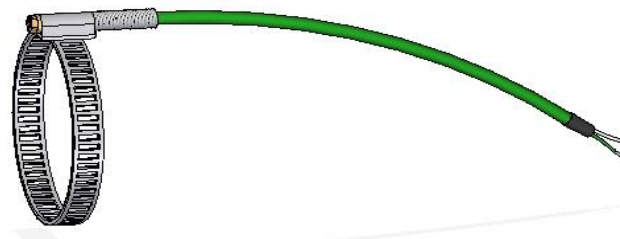
Figura 20. Perfil de temperatura bajo condiciones de enfriamiento ideales¹⁰



Fuente: Plano curva de enfriamiento cilindros, Gerdau Diaco (Anexo 4)

Se tomaron lecturas de temperatura con termopares tipo N, referencia T05-3/R03-3, para registrar la curva de temperatura (Figura 21). Debido a premura en tiempos y en producción, costo de los termopares y complejidad en el montaje de los mismos, sólo se tomó la curva del pase 1, a las otras canales se les tomó una sola lectura a la salida de la barra (Tabla 4) con un medidor infrarrojo RAYTEK 3i (Figura 22).

Figura 21. Termopar tipo N usado



Fuente: Autor del proyecto

Con los termopares se hicieron mediciones en tres pasadas consecutivas de la barra por el primer canal (Tabla 3). Dos de las mediciones se hicieron con el agua chocando contra los cilindros y la tercera se hizo sin ningún tipo de refrigerante. Las celdas sombreadas muestran las temperaturas en los puntos indicados en la Figura 20 para su comparación.

¹⁰ KOITI, Pedro. **LM517 - Cilindros, Anillos y Guías**. Escuela Técnica-Laminación. GERDAU. 2012. Pág. 51

Figura 22. Medidor infrarrojo Raitek 3i2ML3



Fuente: Autor del proyecto

De la Tabla 3 se obtuvieron dos gráficas comparativas, una confrontando la temperatura “ideal” con las dos curvas de temperatura del cilindro mientras es enfriado con el agua (Figura 23) y la otra cotejando la misma temperatura “ideal” con la curva de temperatura del cilindro trabajando sin refrigeración (Figura 24).

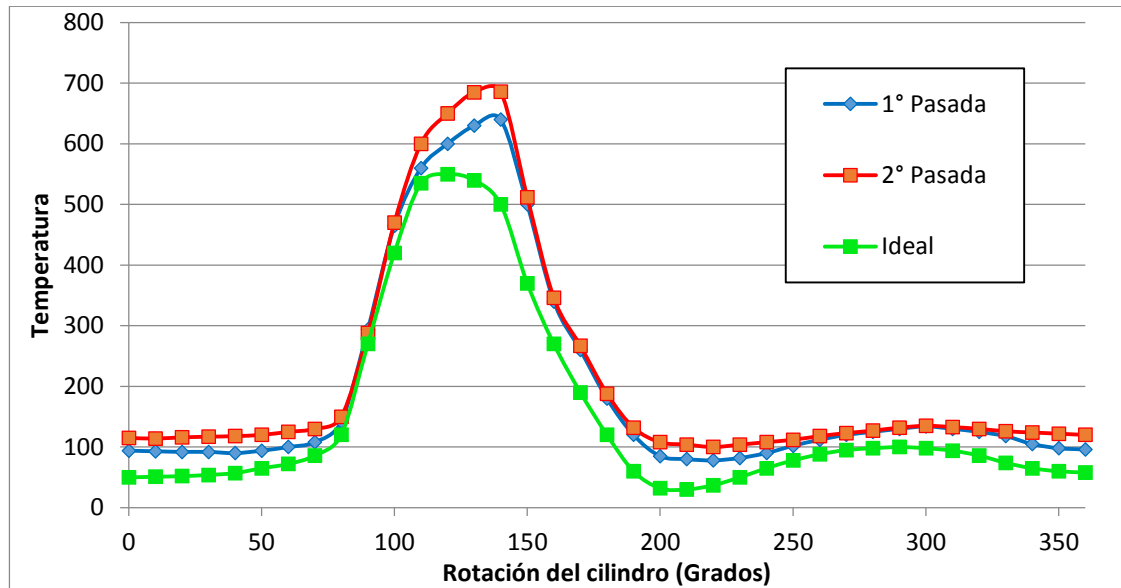
Tabla 3. Temperaturas en el primer canal:

Angulo	1° Pasada	2° Pasada	Sin refrig.	Ideal	Angulo	1° Pasada	2° Pasada	Sin refrig.	Ideal
0	94	115	95	50	190	120	132	482	60
10	93	114	96	51	200	85	108	478	32
20	92	116	99	52	210 (E)	80	104	474	30
30	92	117	104	54	220	78	100	468	37
40 (A)	90	118	110	57	230	82	104	462	50
50	94	120	116	65	240	90	108	455	65
60	100	125	128	72	250	102	112	446	78
70	108	130	138	86	260	112	118	435	88
80 (B)	142	150	172	120	270	120	123	426	95
90	294	288	346	270	280	125	127	412	98
100	465	470	583	420	290	130	132	399	100
110	560	600	802	535	300	134	135	390	98
120 (C)	600	650	854	550	310	130	133	382	94
130	630	685	860	540	320 (F)	125	130	376	86
140	640	686	849	500	330	118	126	373	74
150(D)	500	512	790	370	340	105	124	371	65
160	340	346	680	270	350	98	122	369	60
170	260	267	534	190	360	96	120	368	58
180	180	188	490	120					

Fuente: Autor del proyecto

Con la primera gráfica (Figura 23) se comprobó que la eficiencia de la refrigeración es débil, además se observa que la temperatura aumenta progresivamente con cada pasada y que probablemente por esto es que se desarrollan más gradientes de temperatura en los canales de lo esperado.

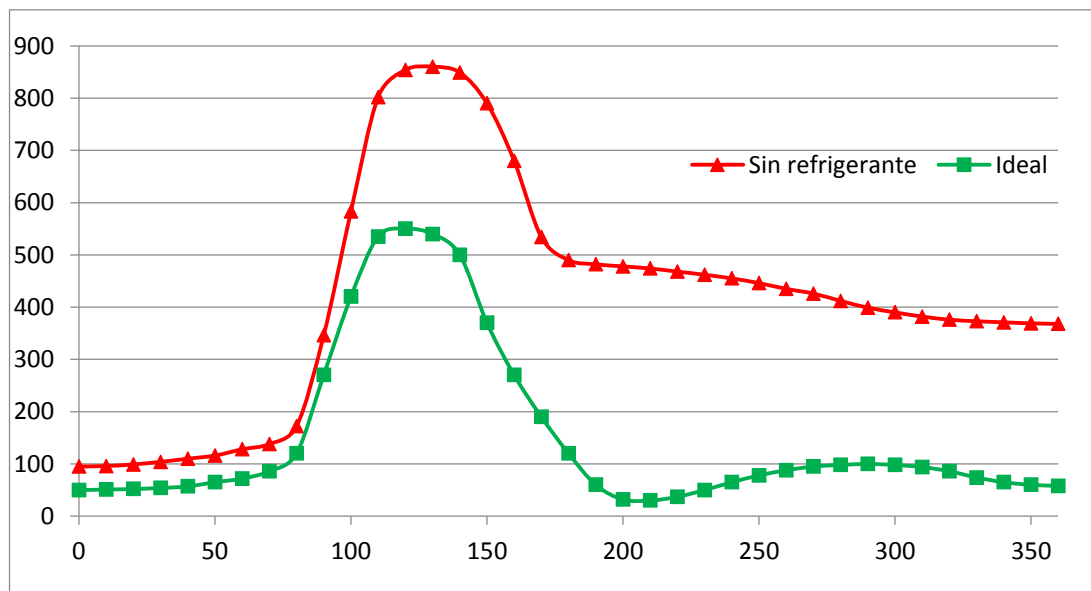
Figura 23. Gráfico de Rotación de cilindro vs temperatura con refrigerante



Fuente: Autor del proyecto

Es notorio también que la velocidad de los cilindros y el bajo flujo del agua que incide en ellos crea un efecto cascada que deja prácticamente sin refrigeración la porción de cilindro adyacente a la salida de la barra (entre los 120° y los 150°), generando que en este punto la temperatura, en vez de empezar a disminuir, sufra un incremento brusco, permitiendo que una mayor cantidad de calor sea conducida hacia el centro del cilindro, lo que teóricamente produciría cambios en la estructura interna del mismo.

Figura 24. Gráfico de la rotación del cilindro vs temperatura sin refrigerante



Fuente: Autor del proyecto

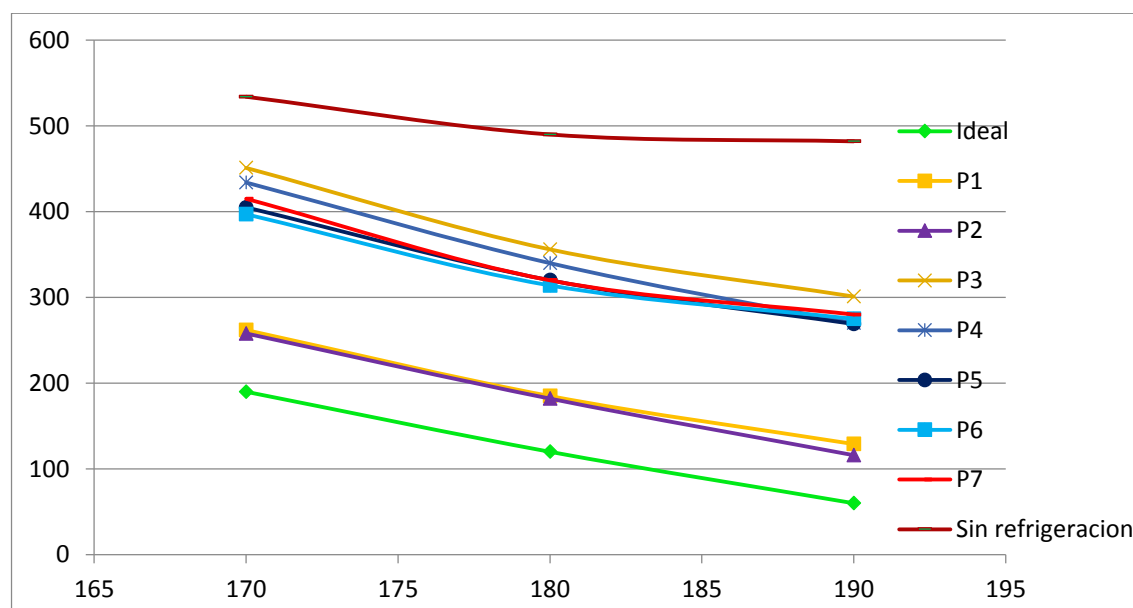
La segunda gráfica comparativa (Figura 24) muestra las altas temperaturas a las que se somete el cilindro y los cambios abruptos que sufre en una sola vuelta sin ningún tipo de refrigeración.

Tabla 4. Temperatura en el fondo de cada canal entre los 170° y 190°

ROTACIÓN	Ideal	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
170°	190	262	258	451	434	405	397	415	423
180°	120	185	182	356	340	320	314	320	312
190°	60	129	116	301	270	269	275	280	260

Fuente: Autor del proyecto

Figura 25. Temperatura del fondo de los canales con la refrigeración existente



Fuente: Autor del proyecto

4.3.2.1. CALIDAD DEL AGUA

Tabla 5. Informe de Resultados Calidad Agua Diaco¹¹

DESCRIPCIÓN	EXPRESIÓN	VALOR OBTENIDO	VALOR MÁX. ACEPTABLE	MÉTODO
TRABAJO DE CAMPO (A)				
Conductividad (A)	microsiemens/cm	840	N.E.	Electrodo específico
pH (A)	unidades	8,03	N.E.	Electrométrico
Temperatura (A)	°C	30,3	N.E.	Sensor calibrado
TRABAJO DE LABORATORIO				
Alcalinidad Total (A)	mg/L CaCO ₃	55,6	N.E.	Volumétrico
Cloruros (A)	mg/L Cl	142,7	N.E.	Argentométrico

¹¹ Informe de Resultados AG12758 – 12. IDEAM. Abril 30, 2012. Anexo 1

CO ₂ - Libre	mg/L CO ₂ - Libre	0,95	N.E.	Nomograma SM 4500-CO2 B
Dureza Cálrica (A)	mg/L CaCO ₃	91,8	N.E.	Complexométrico EDTA
Dureza Total (A)	mg/L CaCO ₃	147,28	N.E.	Complexométrico EDTA
Grasas y Aceites	mg/L	83	N.E.	Gravimétrico - Partición
Hierro Total	mg/L Fe	20,7	N.E.	Espectrofotométrico
Manganeso	mg/L Mn	<0,02	N.E.	Peryodato
Sílice - mg/L SiO ₂	mg/L (SiO ₂)	1	N.E.	Espectrofotométrico
Sólidos Disueltos Totales (A)	mg/L	639	N.E.	Gravimétrico/Cálculo
Sólidos Suspendidos Totales (A)	mg/L	181	N.E.	Filtración/Gravimétrico
Sulfatos (A)	mg/L SO ₄	94,6	N.E.	Turbidimétrico

Fuente: IDEAM. Abril 30, 2012. Anexo 1

4.3.2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS CILINDROS DE DESBASTE

Tabla 6. Nomenclatura de los cilindros Gerdau para largos, propiedades y aplicación:

Cilindro	Tipo de material	Aplicación	Dureza (HSc)	Limite Resistencia (Mpa)
VAF 18	Acero Adamite	Desbastadora	40/45	500/700
VAF 21	Acero Adamite	Desbastadora	45/50	500/700
NODAA	Hierro Fundido Nodular Bainítico	Desbastadora	40/48	600/850
NODE	Hierro Fundido Nodular Bainítico	Desbastadora	45/55	400/550
NODA	Hierro Fundido Nodular Perlítico	Desbastadora	52/57	350/500

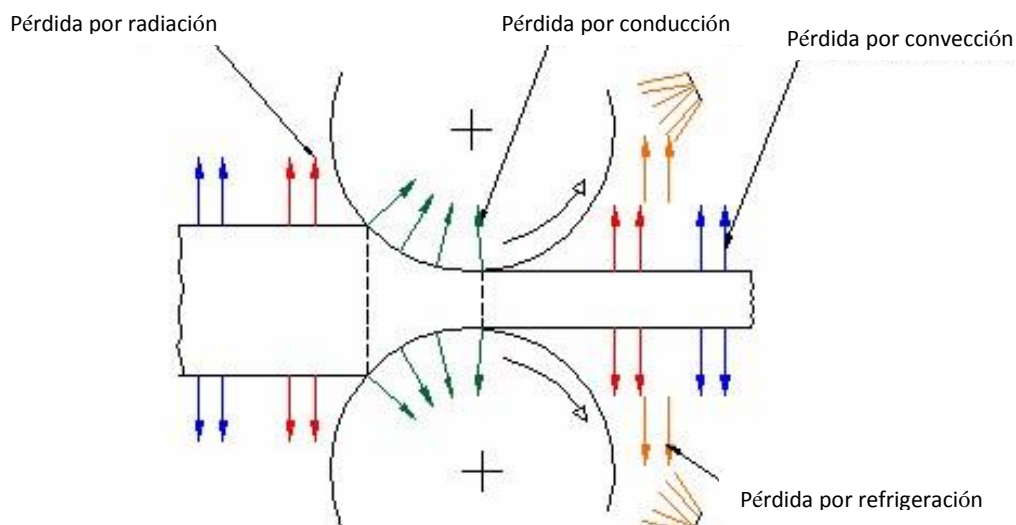
Fuente: Autor del proyecto

5. DESARROLLO DEL DISEÑO

“Enfriar es ya un parámetro relevante para la calidad y la productividad”¹²

Existen múltiples factores que influyen para que la temperatura de los cilindros aumente. La Figura 26 se muestra un esquema de las pérdidas que se generan en la barra en el momento de su laminación.

Figura 26. Transferencia de calor que sufre la barra



Fuente: Autor del proyecto

Cuanto mayor es la temperatura de laminación, menor es la energía gastada para deformar el material y es menor el coeficiente de fricción. También cuanto mayor es la velocidad de laminación menor el tiempo del material pasando por los cilindros, y por consiguiente, mayor será la fuerza necesaria para deformar el material. Con el aumento de la velocidad de deformación, ocurre también un aumento del efecto de la fricción sobre el material desgastando los cilindros de laminación. La vibración también influye en la fuerza de laminación y en la velocidad de salida del material y puede ser prevista utilizando modelos dinámicos de cálculo, pero en este trabajo no se aplicaron debido a la baja influencia de la vibración en el proceso de laminación analizado.

Como se muestra, son muchas las variables a tener en cuenta para el diseño óptimo del sistema de enfriamiento. A continuación se abarca el análisis de cada una de las variables mencionadas en el capítulo 3.4.1.

5.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Para el desarrollo del diseño se tuvieron en cuenta las siguientes características:

¹² CENTELLES, Frencisco. Op Cit.

Tabla 7. Propiedades de los materiales

Material	Calor específico [Kcal/(kg·°C)]	Conductividad térmica [Kcal/m·h·°C]	Densidad [kg/m³]
Hierro fundido nodular	0.13	27.4	7250
Acero rápido - Acero sinterizado	0.12	12	7900
Metal duro 30% aglutinante	0.06	60	12700
Metal duro 15% aglutinante	0.054	69	13500
Agua	1.00	0.53	1000
Aceite	0.46	0.12	858

Fuente: Curso de Laminção barras chatas laminadas¹³

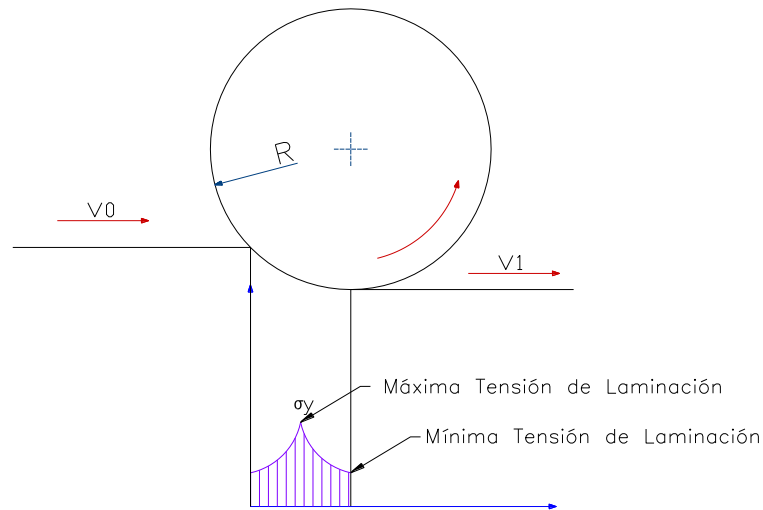
5.1.1. Viscosidad Cinemática:

- Agua = $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
- Aceite = $0.6 \text{ a } 2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

5.2. FUERZA DE LAMINACIÓN:

Es la fuerza necesaria para deformar el material entre los cilindros de laminación. Sólo ocurre en el arco de contacto. La Figura 27 muestra cómo la tensión de laminación se distribuye a lo largo del arco de contacto.

Figura 27. Diagrama de tensiones de laminación



Fuente: Autor del proyecto

Como se ve en el diagrama, las tensiones menores están en los extremos del arco de contacto y la fuerza mayor se aplica en el punto neutro, donde no hay movimiento relativo entre la barra y el cilindro y es aplicada íntegramente para reducir la altura de la barra.

¹³ SILVA, C.F.A. & Garcia, F.P. **Curso de Laminção e Calibração de Produtos Não Planos**. São Paulo: ABM, 1994. Pág. 38

Los modelos matemáticos que se usan para medir la fuerza de laminación son de difícil desarrollo pues el proceso no es lineal, con parámetros y factores interactuando entre sí. Sin embargo, es posible estimar el valor del torque necesario para laminar la barra y la potencia necesaria por modelos empíricos, aplicando factores de corrección para cada tipo de laminador¹⁴. Una ecuación con la que es posible determinar la fuerza de laminación es:

$$F_w = \int_0^{l_c} \sigma dA_c \quad (6)$$

Dónde:

l_c = Arco de contacto

σ = Resistencia al flujo

A_c = Área de contacto proyectada

En la práctica se usa la ecuación:

$$F_w = k_w \times A_c \quad (7)$$

Dónde:

k_w = Resistencia a la deformación

A_c = Área de contacto proyectada

5.2.1. Resistencia a la Deformación:

Depende del factor geométrico, del arco de contacto, de la fricción entre la barra y el cilindro y la tensión de salida del material de la barra laminada:

$$k_w = k_e \times k_f \quad (8)$$

Dónde:

k_e = Factor de influencia de la geometría y la fricción

k_f = Tensión de flujo

Para el cálculo del factor geométrico se tiene la ecuación¹⁵:

$$k_e = 1 + \frac{1.6 \times \mu \times \sqrt{R \times (h_1 - h_0)} - 1.2 \times (h_1 - h_0)}{h_{0m} + h_{1m}} \quad (9)$$

Dónde:

μ = Coeficiente de fricción.

R = Radio del cilindro

h_0 = Altura de la barra antes de pasar por los cilindros

^{14,15} GUO, Y. B.; WEN, Q.; HORSTEMEYER, M. F.: **An Internal State Variable Plasticity Based Approach to Determine Dynamic Loading History Effects on Material Property in Manufacturing Processes**. International Journal of Mechanical Sciences: Elsevier, 2005. Volúmen 47, pg 1423

h_I = Altura de la barra después de pasar por los cilindros

h_{0m} = Altura media de la sección de entrada

h_{1m} = Altura media de la sección de salida

Para el cálculo del coeficiente de fricción, se tiene la siguiente ecuación, dependiendo del tipo de material del cilindro de laminación:

Fundiciones $\mu = (1.05 - 0.0005T_L)$ (10)

Aceros $\mu = 0.8(1.05 - 0.0005T_L)$ (11)

Dónde T_L es la temperatura de la barra en °C.

Para las secciones no rectangulares se usan valores medios de altura según la ecuación:

$$h_m = c \times h_{m\acute{a}x} \quad (12)$$

Dónde:

h_m = Altura media del calibre

$h_{m\acute{a}x}$ = Altura máxima en el fondo del canal

c = Coeficiente de tipo de canal

Tabla 8. Coeficiente para tipo de canal

Tipo de canal	Coeficiente C
Canal con pequeño radio de concordancia	0,63
Canal con cantos vivos	0,55
Canal Redondo	0,79
Canal ovalado	0,67 - 0,85
Canal vertical	0,50 0,65

Fuente: Método de Medición de Fuerza em Laminación; Analogia entre Força Medida e Calculada na Laminação à Quente de Perfis de Aço

Por tanto, aplicando las ecuaciones anteriores:

Tabla 9. Valor Medio de la Altura h_m (Ecuación (12)):

PASE ¹⁶	c	h_{0max} [mm]	h_{0m} [mm]	h_{1max} [mm]	h_{1m} [mm]
1	0,63	130	81,9	101	63,63
2	0,63	101	63,63	86	54,18
3	0,63	145	91,35	95	59,85
4	0,63	95	59,85	61	38,43
5	0,6	110	66	80	48
6	0,6	80	48	53	31,8
7	0,55	77,41	42,58	42	23,1
8	0,55	42	23,1	55,36	30,45

Fuente: Autor del proyecto

¹⁶ Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

Tabla 10. Coeficiente de Fricción μ (Ecuación (10)):

PASE	Tl [°C]	μ
1	1180	0,46
2	1160	0,47
3	1140	0,48
4	1120	0,49
5	1100	0,5
6	1080	0,51
7	1060	0,52
8	1040	0,53

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 11. Factor Geométrico k_e (Ecuación (9)):

PASE ¹⁷	R [mm]	$h0$ [mm]	$h1$ [mm]	μ	$h0m$ [mm]	$h1m$ [mm]	k_e
1	229,5	130	94	0,46	81,9	63,63	1,2
2	237	94	79	0,47	63,63	54,18	1,2
3	232,5	145	89	0,48	91,35	59,85	1,1
4	249,5	89	55	0,49	59,85	38,43	1,3
5	240	110	80	0,5	66	48	1,3
6	253,5	80	53	0,51	48	31,8	1,4
7	259	77,41	42	0,52	42,5755	23,1	1,6
8	252,32	42	55,36	0,53	23,1	30,448	2,2

Fuente: Autor del proyecto

5.2.1.1. TENSIÓN DE FLUJO: Cada material posee una determinada resistencia al flujo cuando sufre deformación. Esta resistencia a la deformación varía con las condiciones encontradas en la estructura cristalina, donde una acumulación de tensiones de uno o varios procesos anteriores pueden aumentarla (Figura 28).

Este efecto es causado por el flujo del material al pasar por el laminador, donde la región central de la barra tiende a forzar el material hacia adelante y las regiones laterales tienden a desplazar hacia los lados, formando diferentes sentidos de desplazamiento en la barra. Cuanto mayor sea la anchura del material laminado, mayor será este efecto. El camino de deformación afecta la recristalización del material y, por consiguiente, la fuerza necesaria para laminar un material.¹⁸

Para el cálculo de la tensión de flujo, se usa la siguiente ecuación:

$$k_f = \sigma + \eta \times \dot{\phi} \quad (13)$$

¹⁷ Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

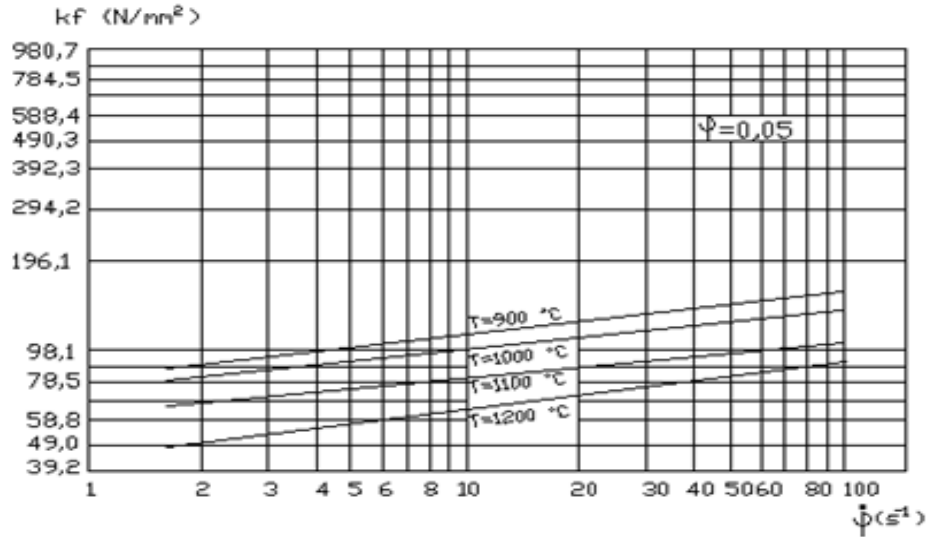
¹⁸ DUAN, X.; SHEPPARD, T.: **The Influence of the Constitutive Equation on the Simulation of a Hot Rolling Process.** Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volúmen 150, pg 100 - 106.

Donde:

η = Coeficiente de plasticidad del material

$\dot{\phi}$ = Velocidad de deformación

Figura 28. Curva de la tensión de flujo de un acero con 0,15% de carbono



Fuente: Método de Medición de Fuerza en Laminación; Analogia entre Força Medida e Calculada na Laminação à Quente de Perfis de Aço

Para el cálculo de la resistencia al flujo, en un ensayo uniaxial, con $\phi = 0$, se utiliza la ecuación:

$$\sigma = (14 - 0.01T_L) \times (1.4 + C\% + Mn\% + 0.3Ca\%) \quad (14)$$

Dónde:

C% = Porcentaje de carbono presente en la barra

Mn% = Porcentaje de manganeso presente en la barra

Ca% = Porcentaje de Calcio presente en la barra

Para el cálculo del coeficiente de plasticidad del material laminado, se tiene la ecuación:

$$\eta = 0.01 \times (14 - 0.01T_L) \times C_v \quad (15)$$

Donde C_v es un factor de corrección, el cuál será:

$$\text{Para } v > 3\text{m/s} \quad C_v = 1.094 \times e^{-0.03v} \quad (16)$$

$$\text{Para } v \leq 3\text{m/s} \quad C_v = 1 \quad (17)$$

Para el cálculo de la velocidad de deformación se usa la ecuación:

$$\dot{\phi} = \frac{2v_t \sqrt{\frac{h_0 - h_1}{R}}}{h_{0m} - h_{1m}} \quad (18)$$

Dónde:

v_t = Velocidad periférica en el fondo del canal en mm/s

Aplicando las ecuaciones anteriores:

Tabla 12. Resistencia al Flujo σ (Ecuación (14)):

PASE ¹⁹	Tl [°C]	%C	%Mn	%Ca	σ
1	1180	0,26	1,00	-	5,852
2	1160	0,26	1,00	-	6,384
3	1140	0,26	1,00	-	6,916
4	1120	0,26	1,00	-	7,448
5	1100	0,26	1,00	-	7,980
6	1080	0,26	1,00	-	8,512
7	1060	0,26	1,00	-	9,044
8	1040	0,26	1,00	-	9,576

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 13. Coeficiente de Plasticidad η (Ecuación (15)):

PASE	Tl [°C]	ω [rad/s]	v [mm/s]	Cv	η
1	1180	10,47	2403,32	3,00	0,066
2	1160	10,47	2481,86	3,00	0,072
3	1140	10,47	2434,73	3,00	0,078
4	1120	10,47	2612,76	3,00	0,084
5	1100	10,47	2513,27	3,00	0,090
6	1080	10,47	2654,65	3,00	0,096
7	1060	10,47	2712,24	3,00	0,102
8	1040	10,47	2642,29	3,00	0,108

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 14. Velocidad de Deformación ϕ (Ecuación (18)):

PASE	R [mm]	$h0$ [mm]	$h1$ [mm]	$h0m$ [mm]	$h1m$ [mm]	ω [rad/s]	v_L [mm/s]	ϕ
1	229,5	130	94	81,9	63,63	10,47	2403,32	0,324
2	237	94	79	63,63	54,18	10,47	2481,86	0,174
3	232,5	145	89	91,35	59,85	10,47	2434,73	0,488
4	249,5	89	55	59,85	38,43	10,47	2612,76	0,481
5	240	110	80	66	48	10,47	2513,27	0,318
6	253,5	80	53	48	31,8	10,47	2654,65	0,412
7	259	77,41	42	42,58	23,1	10,47	2712,24	0,611
8	252,32	42	55,36	23,1	30,448	10,47	2642,29	0,276

Fuente: Autor del proyecto

¹⁹ Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

Tabla 15. Tensión de flujo k_f (Ecuación (13)):

PASE ²⁰	σ	η	φ	$\dot{\varphi}$ [s ⁻¹]	k_f
1	5,852	0,066	0,324	13,08	6,7
2	6,384	0,072	0,174	10,60	7,1
3	6,916	0,078	0,488	15,81	8,1
4	7,448	0,084	0,481	19,63	9,1
5	7,980	0,090	0,318	15,59	9,4
6	8,512	0,096	0,412	21,71	10,6
7	9,044	0,102	0,611	30,54	12,2
8	9,576	0,108	0,276	22,708	12,0

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 16. Resistencia a la Deformación k_w (Ecuación (8)):

PASE	k_e	k_f	k_w [N/mm ²]
1	1,2	6,7	78,1
2	1,2	7,1	87,8
3	1,1	8,1	92,5
4	1,3	9,1	120,0
5	1,3	9,4	120,1
6	1,4	10,6	152,6
7	1,6	12,2	190,4
8	2,2	12,0	266,9

Fuente: Autor del proyecto

5.2.2. Arco de Contacto:

Es la parte del cilindro de laminación que comienza cuando la barra toca ambos cilindros hasta la salida de la misma. En el arco de contacto se produce la deformación de la barra. La Figura 29 muestra la representación geométrica del arco de contacto en el cilindro de laminación, donde R es el radio del cilindro, α_c es el ángulo de contacto, h_0 es la altura inicial de la barra, h_1 es la altura final de la barra y L es la proyección horizontal del arco de contacto.

Para definir matemáticamente el arco de contacto, se precisa primero la proyección de dicho arco:

$$L = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{|\Delta h|}{2}\right)^2} \quad (19)$$

Simplificando:

$$L = \sqrt{R \times |\Delta h| - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}$$

²⁰ Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

Ahora, por geometría, el ángulo de contacto es:

$$\alpha_c = \sin^{-1}\left(\frac{L}{R}\right) \quad (20)$$

Y el arco de contacto es la longitud de cuerda:

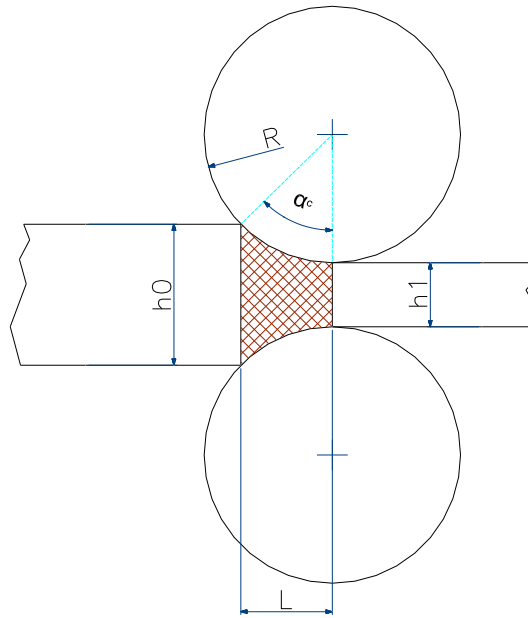
$$l_c = R \times \alpha_c \quad (21)$$

Por ende, reemplazando L y α_c :

$$l_c = R \times \sin^{-1}\left(\frac{L}{R}\right)$$

$$l_c = R \times \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{R \times |\Delta h| - \left(\frac{\Delta h}{2}\right)^2}}{R}\right)$$

Figura 29. Representación geométrica del arco del contacto



Fuente: Autor del proyecto

Como $(\Delta h/2)^2 \ll R \times \Delta h$, se puede simplificar la ecuación así:

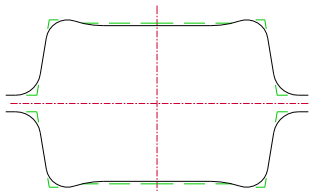
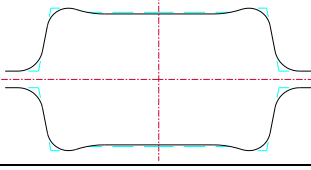
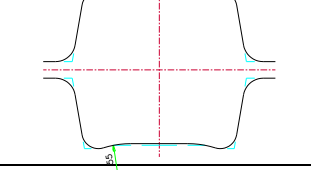
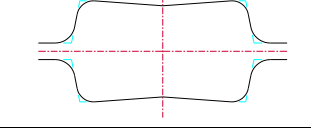
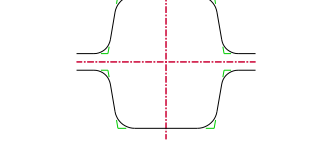
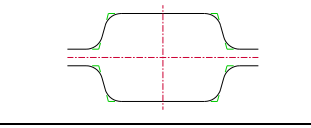
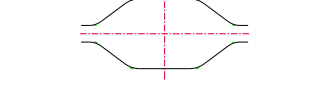
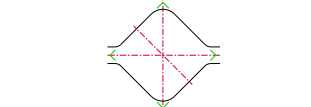
$$l_c = \sqrt{R \times |\Delta h|} \quad (22)$$

Esta ecuación se usa por tener un error de menos del 1% si $\Delta h < 0.08R^{21}$.

Para cada uno de los pases de los cilindros laminadores analizados, el área de contacto es:

²¹SCHAEFFER, L. **Método de Medição de Força em Laminação**. Disertación de Mestría. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1976. 116 pág.

Tabla 17. Arcos de contacto de los pases 1 a 8

PASE	ESQUEMA	R [mm]	$h0$ [mm]	$h1$ [mm]	lc [mm]
1		229,5	130	94	90,90
2		237	94	79	59,62
3		232,5	145	89	114,11
4		249,5	89	55	92,10
5		240	110	80	84,85
6		253,5	80	53	82,73
7		259	77,41	42	95,77
8		252,32	83	55,36	83,51

Fuente: Autor del proyecto

5.2.2.1. AREA DE CONTACTO: Si se proyecta el arco de contacto por toda la superficie con la que la barra está tocando en el instante de atravesar cada pase en el laminado, se obtendrá el área de contacto, necesaria para el análisis. La ecuación que denota una aproximación cercana al valor real es:

$$A_c = l_c \times b_m \quad (23)$$

En la ecuación anterior, b_m es el ancho medio de la barra, la cual se halla con la ecuación:

$$b_m = \frac{b_1 + b_0}{2} \quad (24)$$

Dónde:

b_0 = Ancho de la barra antes de pasar por el cilindro

b_1 = Ancho teórico de la barra después de pasar por el cilindro

Aplicando estas ecuaciones, el área de cada pase es:

Tabla 18. Área de contacto para cada uno de los pases

PASE ²²	l_c [mm]	b_0 [mm]	b_1 [mm]	b_m [mm]	A_c [mm ²]
1	90,9	130	145	137,5	12498,1
2	59,6	145	145	145	8645,5
3	114,1	79	105	92	10497,7
4	92,1	105	110	107,5	9901,1
5	84,86	55	70	62,5	5303,3
6	82,7	70	77,41	73,705	6097,7
7	95,8	53	83	68	6512,1
8	58,1	83	63,64	73,32	4257,0

Fuente: Autor del proyecto

Finalmente, la fuerza de laminación será:

Tabla 19. Fuerza de laminación en cada pase

PASE	A_c [mm ²]	k_w [N/mm ²]	F_w [kN]
1	12498,1	78,1	975,97
2	8645,5	87,8	758,67
3	10497,7	92,5	971,04
4	9901,1	120,0	1.188,52
5	5303,3	120,1	636,78
6	6097,7	152,6	930,42
7	6512,1	190,4	1.240,14
8	4257,0	266,9	1.136,17

Fuente: Autor del proyecto

5.2.3. Esfuerzos Sobre El Canal

5.2.3.1. ESFUERZOS TOTALES:

Los esfuerzos totales resultan de la suma de los esfuerzos debidos a la temperatura y a los debidos a las deformaciones. Se hallan con la siguiente ecuación:

²² Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

$$T_t = \sigma_T + \sigma_F \quad (25)$$

Dónde:

σ_T = esfuerzos debidos a ciclo térmico

σ_F = esfuerzo de deformación de la barra

Los esfuerzos debidos al ciclo térmico se hallan con la ecuación:

$$\sigma_T = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (26)$$

Dónde:

α = coeficiente de dilatación térmica

E = módulo de elasticidad

ΔT = Cambio de temperatura del canal en el laminado

Para el cambio de temperatura se usa la siguiente ecuación:

$$\Delta T = T_{CS} - T_{CR} \quad (27)$$

Dónde:

T_{CS} = temperatura del canal a la salida de la barra (450-550°C)

T_{CR} = temperatura del canal refrigerado (50°C)

El esfuerzo de deformación de la barra se halla con la siguiente ecuación:

$$\sigma_F = \frac{F_w}{A_c} \quad (28)$$

Dónde:

F_w = fuerza de laminación

A_c = superficie de contacto barra-canal

Teóricamente, los esfuerzos que soportan los cilindros según el material del que están hechos es:

σ_T **hierro fundido nodular** = 74 kgf/mm²

σ_T **metal duro** = 135 kgf/mm²

Observación: en el centro de los canales de forma hueso de perro, en las esquinas y los canales acabadores de los ángulos ocurre una gran penetración de calor, causando un aumento de hasta 50% en el valor de σ_T en esa región, por tanto:

σ'_F = 20 a 40 kgf/mm² (Adicionales a σ_F)

Por ende, para los cilindros indicados en la Tabla 6:

Tabla 20. Esfuerzos para Cilindros de Acero

CILINDROS		VAF 18 - VAF 21							
MATERIAL		Acero Adamite		DUREZA	40/50 HSc	RESISTENCIA LÍMITE [MPa]		1300	
COEF. DE DILATACIÓN TÉRMICA (α) [°C-1]				1,16E-05	MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) [N/m²]			2E+11	
PASE ²³	Tcs [°C]	Tcr [°C]	ΔT [°C]	σ_T [MPa]	Fw [kN]	Ac [mm²]	σ_F [MPa]	Tt [MPa]	
1	680	85	595	1.380	975,97	12.498,14	78,09	1.458,49	
2	680	85	595	1.380	758,67	8.645,45	87,75	1.468,15	
3	686	84	602	1.397	971,04	10.497,68	92,50	1.489,14	
4	686	84	602	1.397	1.188,52	9.901,09	120,04	1.516,68	
5	683	82	601	1.394	636,78	5.303,30	120,07	1.514,39	
6	683	82	601	1.394	930,42	6.097,72	152,59	1.546,91	
7	679	84	595	1.380	1.240,14	6.512,11	190,44	1.570,84	
8	679	84	595	1.380	1.136,17	4.256,98	266,90	1.647,30	

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 21. Esfuerzos para Cilindros de Fundición Nodular

CILINDRO		NOD AA - NOD E - NOD A						
MATERIAL		Hierro Fundido Nodular Bainítico		DUREZA	40/48 HSc	RESISTENCIA LÍMITE [MPa]		750
COEF. DE DILATACIÓN TÉRMICA (α) [°C-1]				9,00E-06	MÓDULO DE ELASTICIDAD (E) [N/m²]			1,42E+11
PASE	T_{cs} [°C]	T_{cr} [°C]	ΔT [°C]	σ_T [MPa]	F_w [kN]	A_c [mm²]	σ_F [MPa]	T_t [MPa]
1	680	85	595	760	975,97	12.498,14	78,09	838,50
2	680	85	595	760	758,67	8.645,45	87,75	848,16
3	686	84	602	769	971,04	10.497,68	92,50	861,86
4	686	84	602	769	1.188,52	9.901,09	120,04	889,40
5	683	82	601	768	636,78	5.303,30	120,07	888,15
6	683	82	601	768	930,42	6.097,72	152,59	920,66
7	679	84	595	760	1.240,14	6.512,11	190,44	950,85
8	679	84	595	760	1.136,17	4.256,98	266,90	1.027,31

Fuente: Autor del proyecto

5.2.4. Cálculo Del Caudal

El caudal (Q) a hallar es la cantidad de agua por hora necesaria para remover el calor absorbido por los cilindros durante el proceso de laminación. Para su análisis se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2C}{f_p \cdot C_A \cdot \Delta T_A \cdot \delta_A} \left[m^3/h \right] \text{ por jaula} \quad (29)$$

²³ Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

Dónde:

C = calor absorbido por el canal [Kcal/h]

fp = factor de pérdida (Se usa 0,7)

Ca = calor específico del agua [Kcal/kg°C]

ΔTA = diferencia entre la temperatura de salida y de entrada de agua de refrigeración (°C)

δa = densidad del agua

Para hallar el calor absorbido por el canal se usa la siguiente ecuación:

$$C = K_c \cdot b_{cs} \cdot \sqrt{l_c \cdot v_L} \quad (30)$$

Dónde:

Kc = Factor de conductividad térmica del cilindro

bcs = contacto transversal barra-canal (mm)

bsc = canales de la caja, redondo = ancho del canal x 1.25

bsc = canal ovalado sueco, ovalado = ancho del canal x 1.00

lc = arco de contacto (mm)

v = velocidad de laminación (m/s)

La transferencia de calor aplicada en laminación presenta condiciones extras para el análisis, pues el sistema opera sin generación interna de calor con efectos multidireccionales variando a lo largo del tiempo. Por ende, puede tomarse la laminación en caliente como problema de tipo no estacionario, o transitorio, con cambios en el sistema de análisis. El factor de conductividad térmica es una función compleja, por tanto, en este trabajo se usaron valores obtenidos experimentalmente en diversos estudios realizados en cilindros²⁴:

$$K_c = f(C_c, \delta_c, T_{cs}) \quad (31)$$

Dónde:

Cc = calor específico del cilindro

δc = densidad del cilindro

Tcs = temperatura del cilindro a la salida de la barra

Tabla 22. Valores del Factor de conductividad térmica del cilindro (**Kc**):

Cilindro	550°C	500°C	450°C	Regresión
Hierro fundido nodular	264	238	211	$y = 0,53x - 27,333$
Metal duro 30% aglutinante	351	316	281	$y = 0,7x - 34$
Metal duro 15-20% aglutinante		328	291	$y = 0,755x - 49,55$

Fuente: Refrigeração de Cilindros de Laminação (aços longos)²⁵

²⁴ SHURIZLY, A.; Leonard, J. G.: **The Effect of Scaling and Emulsion Delivery on Heat Transfer During the Hot Rolling of Steel Strips**. Diario de Tecnología de Procesamiento de Materiales: Elsevier, 2000. Volúmen 101, Pág. 250-259.

²⁵ HERBERT Damm, Heinz. **REFRIGERAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO (AÇOS LONGOS) - MANUAL**. São Caetano do Sul 2007. Pág. 7

Usando las fórmulas anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 23. Caudal medio para los distintos Cilindros desbastadores (Ecuación (29)):

f_p	0,7		$Ta0$ [°C]	25		ΔT [°C]	60
Ca [kcal/kg°C]	1		$Ta1$ [°C]	85		δa [kg/m³]	1000
HIERRO FUNDIDO NODULAR							
PASE²⁶	Tl [K]	Kc [kcal/(h m K)]	bcs [mm]	lc [mm]	v [m/s]	C [kcal/h]	Q [m³/h]
1	1133	573,2	223,0	90,9	2,40	1.234.573	58,79
2	1133	573,2	208,0	59,6	2,48	939.513	44,74
3	1133	573,2	177,0	114,1	2,43	1.095.177	52,15
4	1133	573,2	152,0	92,1	2,61	847.869	40,37
5	1133	573,2	130,0	84,9	2,51	696.448	33,16
6	1133	573,2	111,0	82,7	2,65	587.882	27,99
7	1133	573,2	94,0	95,8	2,71	534.653	25,46
8	1133	573,2	80,0	58,1	2,64	357.246	17,01
METAL DURO 30% AGLUTINANTE							
PASE	Tl [K]	Kc [kcal/(h m K)]	bcs [mm]	lc [mm]	v [m/s]	C [kcal/h]	Q [m³/h]
1	893	591,1	223,0	90,9	2,40	1.273.222	60,63
2	893	591,1	208,0	59,6	2,48	968.925	46,14
3	893	591,1	177,0	114,1	2,43	1.129.462	53,78
4	893	591,1	152,0	92,1	2,61	874.412	41,64
5	893	591,1	130,0	84,9	2,51	718.250	34,20
6	893	591,1	111,0	82,7	2,65	606.286	28,87
7	893	591,1	94,0	95,8	2,71	551.391	26,26
8	893	591,1	80,0	58,1	2,64	368.430	17,54
METAL DURO 15%-20% AGLUTINANTE							
1	953	670,0	223,0	90,9	2,40	1.443.096	68,72
2	953	670,0	208,0	59,6	2,48	1.098.199	52,30
3	953	670,0	177,0	114,1	2,43	1.280.156	60,96
4	953	670,0	152,0	92,1	2,61	991.077	47,19
5	953	670,0	130,0	84,9	2,51	814.080	38,77
6	953	670,0	111,0	82,7	2,65	687.177	32,72
7	953	670,0	94,0	95,8	2,71	624.958	29,76
8	953	670,0	80,0	58,1	2,64	417.586	19,89

Fuente: Autor del proyecto

Con la información obtenida en la Tabla 23, se puede generalizar para cálculos posteriores, así:

²⁶ Esquema de pases o canales, ver Tabla 17

Tabla 24. Valores de caudal medio para cilindros de hierro fundido:

Cilindro	Diámetro [mm]	Caudal por jaula [m³/h]
Desbaste	450 – 600	50 - 70
Intermedio	350 - 400	45 – 60

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 25. Valores de caudal medio para cilindros de metal duro y acero rápido:

Descripción-Diámetro	Caudal por jaula [m³/h]
D = 350-400 mm	40 – 60
D = 12"	35 – 50
D = 10"	30 – 45
Esquina hueso de perro	35 – 55
Angulo	
1"	40 – 50
1 ½"	50 - 60
2"	60 – 70
Chato	
L = 20 – 40 mm	30 – 40
L = 40 – 80 mm	40 – 50
L = 80 – 120 mm	50 – 60
Bloque cilindros 6"	15 – 30
Bloque cilindros 8"	20 – 40

Fuente: Autor del proyecto

5.2.5. Remoción del Calor Acumulado Por Canal

La mayor parte del calor acumulado en la canal es removida por el agua de refrigeración a través de convección forzada. Una pequeña parte es transferida a través del cambio de la fase líquida al vapor. Esta parte no será considerada en este análisis.

La cantidad de calor removido del canal se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Q_c = h_c \cdot A_t \cdot \Delta T_A \left[\frac{kcal}{h} \right] \quad (32)$$

Dónde:

h_c = coeficiente de transferencia de calor del agua por convección forzada [Kcal/(h·m²·°C)].

A_t = Área de transferencia de calor (m²/h).

ΔT_A = temperatura de salida - temperatura de entrada del agua de refrigeración en el laminador.

5.2.5.1. COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL AGUA POR CONVECCIÓN: El valor de h_c varía entre 500 y 300.000 Kcal/(h·m²·°C) dependiendo de las condiciones de operación (presión, distancia de la boquilla hasta el canal, Angulo de caída, etc.). El cálculo de este coeficiente, además de complejo, es de poca utilidad práctica. Lo importante es saber cómo cada una de las variables (presión, distancia de la boquilla hasta el canal, ángulo de caída e impurezas) influye en el valor de h_c (ecuación (32)). Éste valor puede ser expresado por la siguiente ecuación²⁷:

$$h_c = \lambda \cdot p^{0.72} \quad (33)$$

Que es válido para una presión de entre 2 a 7 bar.

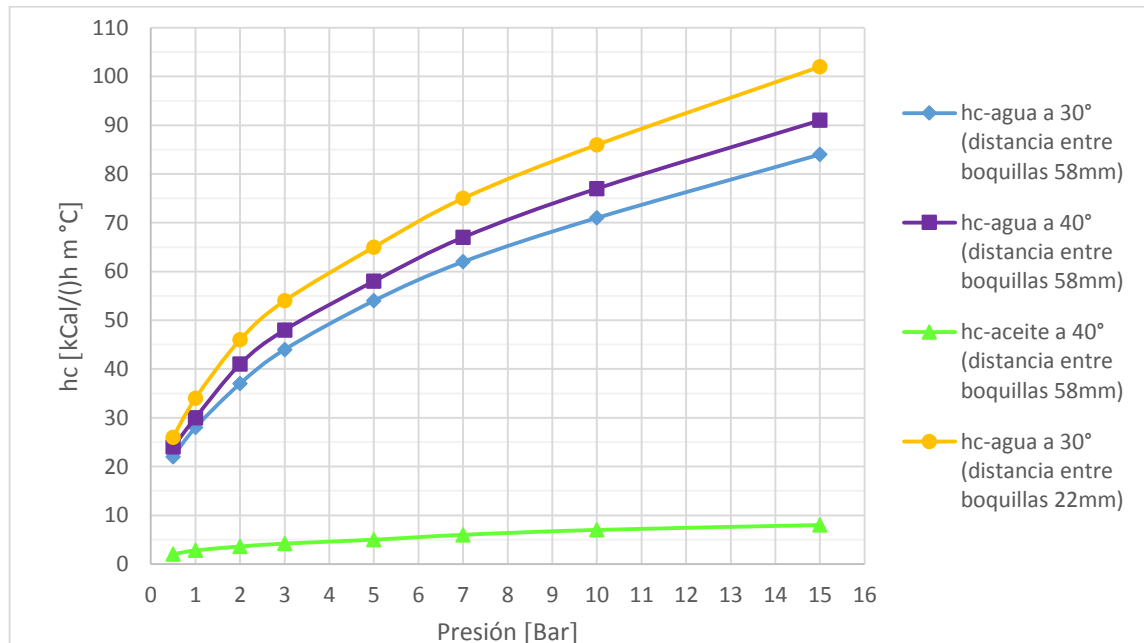
Dónde:

λ = factor de conducción térmica del canal

p = presión manométrica en el interior de la cinta de refrigeración

El factor de conducción térmica del canal (λ) disminuye con el aumento del ángulo de caída del agua y de la distancia de salida de la boquilla hasta la superficie del canal. Además de esto, λ se ve reducido drásticamente por la presencia de aceite, debido a la baja conductividad térmica, al calor específico y a la elevada viscosidad de este material ($\lambda_{\text{aceite}}/\lambda_{\text{agua}} < 0.02$).

Figura 30. Coeficiente de transmisión de calor por convección (h_c) vs. Presión



Fuente: Autor del proyecto, resultados de simulación en Solidworks.

²⁷ HERBERT Damm, Heinz. **REFRIGERAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO (AÇOS LONGOS)**. São Caetano do Sul 2007. Pág. 76

Se debe tener en cuenta que toda la energía contenida en el agua debido a la compresión en el interior de la cinta es transformada en energía cinética, responsable del régimen turbulento del agua sobre el canal.

Tabla 26. Presión por velocidad de laminación:

v_L [m/s]	Presión [bar]
0.2 – 15	2 - 4
16 – 45	4 - 5
46 – 75	5 - 6
Encima de 75	7

Fuente: Autor del proyecto

5.2.5.2. **ÁREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR:** Está dada por la siguiente ecuación:

$$A_t = \frac{3,6 \cdot v_L \cdot b_m \cdot \theta}{360^\circ} \left[m^2/h \right] \quad (34)$$

Dónde:

V_L = Velocidad de laminación [m/s].

bm = Ancho medio del canal [mm].

θ = Angulo de cobertura de la cinta.

En el desbaste existe una gran acumulación del calor en la región del canal. Como área de transferencia de calor es pequeña, se necesita una elevada presión para remover el calor y romper la capa aislante de agua y vapor que se forma en la superficie del canal.

Los resultados, al analizar usando las ecuaciones mencionadas, son:

Tabla 27. Area de transferencia de calor (Ecuación (34)):

PASE	v_L [m/s]	bm [m]	θ	At [m²/h]
1	2,40	137,5	120,0	396,5
2	2,48	145,0	120,0	431,8
3	2,43	92,0	120,0	268,8
4	2,61	107,5	120,0	337,0
5	2,51	62,5	120,0	188,5
6	2,65	73,7	120,0	234,8
7	2,71	68,0	120,0	221,3
8	2,64	73,3	120,0	232,5

Fuente: Autor del proyecto

5.2.6. BOQUILLAS DE REFRIGERACION

Las boquillas pueden ser de tres tipos: espray, canales o agujeros redondos. Es necesario usar una boquilla de tipo espray por los siguientes motivos:

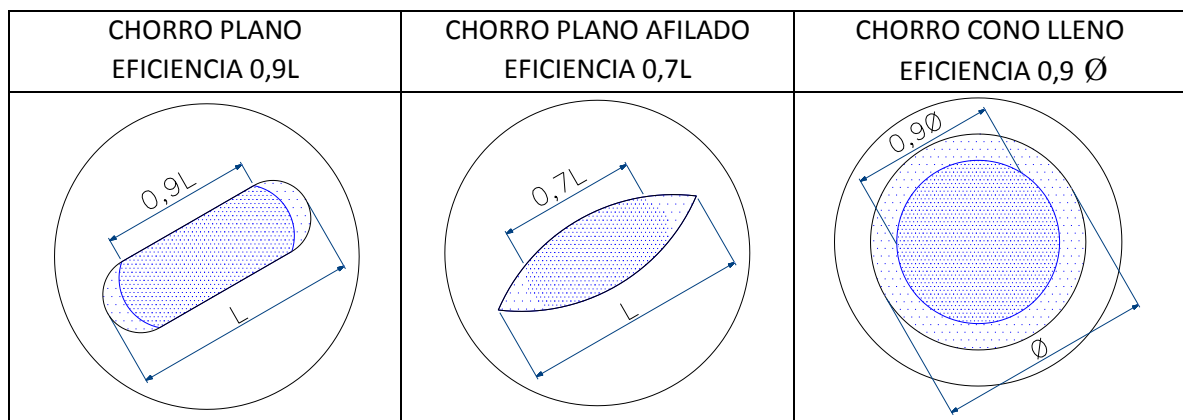
- Dimensionamiento preciso del caudal en función de la presión.
- Direccionamiento exacto del ángulo de caída para los puntos de concentración de calor.
- Agua en gotas, lo que aumenta el área de refrigeración del agua.

Las cintas con canales y agujeros redondos tienen las siguientes desventajas:

- Mayor pérdida de agua.
- Difícil direccionamiento del agua para los puntos de concentración del calor.
- Difícil formar gotas con el chorro.
- El chorro incide perpendicularmente a la superficie del canal.

5.2.6.1. FORMA DEL CHORRO: El chorro debe ejercer un impacto sobre la superficie del canal que permita romper la capa aislante de agua y vapor y proporcionar una remoción eficiente del calor. Para la refrigeración de los canales de laminación se recomiendan chorros planos, afilados y de cono lleno (Figura 31). En los bordes de los chorros debe haber pocas gotas.

Figura 31. Tipos de Chorro



Fuente: Refrigeração de Cilindros de Laminação (aços longos)²⁸

5.2.6.2. CAUDAL DE LAS BOQUILLAS (Q_b): Es calculado a través de la ecuación de caudal para pequeños orificios:

$$Q_b = C_d \cdot A_b \cdot p^{1/2} \left[m^3/h \right] \quad (35)$$

Dónde:

C_d = Factor de descarga, varía con la forma del orificio y con la longitud de la boquilla.

A_b = área de la boquilla [mm^2]. Para el cálculo del caudal de la cinta de refrigeración se usa la ecuación anterior desde que la suma de las áreas de las boquillas sea 1/3 del área transversal de la cinta.

p = presión manométrica medida al interior de la cinta [bar].

²⁸ HERBERT Damm, Heinz. Op. Cit. Pág. 13

5.2.6.3. **IMPACTO:** Es la fuerza que el chorro ejerce sobre el canal. Según los sistemas atomizadores, el impacto teórico es dado por la ecuación:

$$I = 0.024 \cdot Q_b \cdot p^{1/2} \text{ (kg)} \quad (36)$$

Dónde:

Q_b = Caudal de la boquilla [L/min].

Para obtener un impacto por unidad de área (kg/cm²) se multiplica el valor del impacto teórico por los factores de la tabla abajo (válidos para una distancia de salida de la boquilla menor o igual a 300 mm):

Tabla 28. Angulo del chorro vs. Factor de impacto por unidad de área:

Angulo del chorro	Chorro plano	Chorro cono lleno
15°	0,3	0,11
30°	0,155	0,025
50°	0,1	0,01
60°	0,07	0,004
80°	0,05	0,002

Fuente: Refrigeração de Cilindros de Laminação (aços longos)²⁹

5.2.6.4. **ÁNGULO DEL CHORRO PARA LA REFRIGERACIÓN DE CANALES:** Se usan ángulos entre 15° y 60°. Encima de 60° el impacto por unidad de área es muy reducido, existiendo el riesgo de no perforar la capa aislante de agua y vapor, perjudicando la remoción del calor.

Con lo anterior, se realizó el análisis y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 29. Caudal e impacto de las boquillas para cubrir un ángulo de 60° (por boquilla):

Tipo	C_d	A_b [mm ²]	P [bar]	Q_b [m ³ /h]	Q_b [L/min]	I [kg]	I Chorro plano (para 60°) [kg/cm ²]	I Chorro Cono lleno (para 60°) [kg/cm ²]
Cilíndrica	0,50	19,6	2,5	15,52	258,71	9,8	0,69	0,04
Canal	0,70	40,0	2,5	44,27	737,86	28,0	1,96	0,11
Spray	0,90	32,0	2,5	45,54	758,95	28,8	2,02	0,12

Fuente: Autor del proyecto

5.2.6.5. **MATERIAL DE LA BOQUILLA:**

Se escogió Acero AISI 316 que posee buena resistencia al desgaste, además es un material inoxidable, lo que implica que su vida útil sea más larga en este proceso.

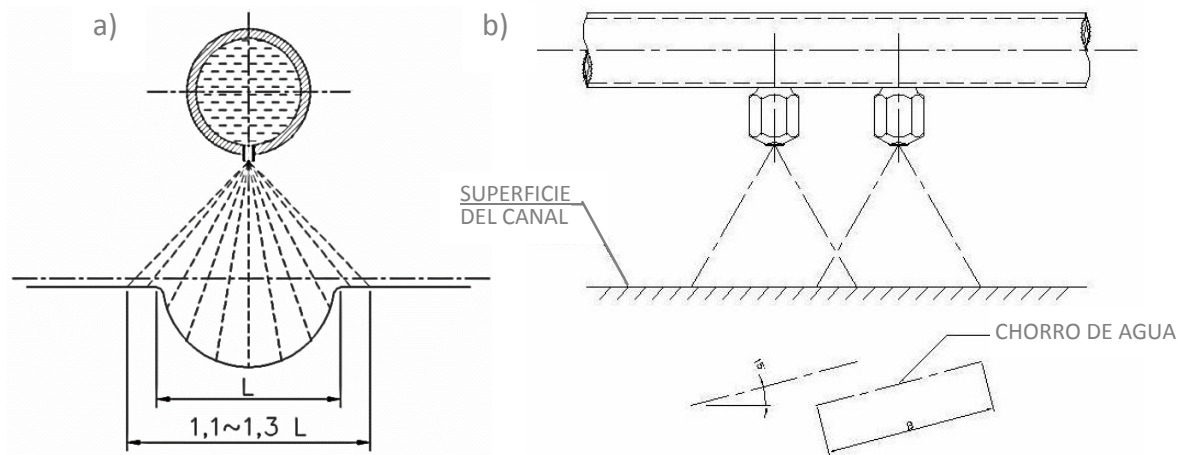
5.2.6.6. **COBERTURA DEL CANAL:**

Para lograr una buena refrigeración, la cobertura del canal debe ser de 110 a 130%, dependiendo del tipo de boquilla (Figura 32, parte a)).

²⁹ HERBERT Damm, Heinz. Op. Cit. Pág. 12

Cuando el canal es demasiado grande se deben usar dos o más boquillas dispuestas en una misma línea para cobertura completa del mismo. Las boquillas deben estar desfasadas al menos 15° para evitar la colisión entre los chorros. Además de eso, debe haber una sobreposición de los chorros de entre 20 a 35% para compensar la baja concentración de gotas en los bordes (Figura 32, parte b)).

Figura 32. Cobertura del canal



Fuente: Autor del proyecto

5.2.6.7. DESGASTE DE LAS BOQUILLAS:

Con el uso ocurre un desgaste en la salida de las boquillas. Este desgaste altera la curva de distribución de las gotas, concentrando más gotas hacia el centro del canal. Además de esto, existe una reducción el impacto por unidad de área y en el ángulo del chorro, perjudicando la remoción del calor. El control del desgaste de las boquillas se puede realizar a través de un medidor de caudal instalado en el tubo de entrada de las cintas, en la conexión con los manifolds.

5.3. CINTAS DE REFRIGERACION

5.3.1. Consideraciones Para el Chorro de Agua:

- Debe coincidir en los puntos de concentración de calor. Las primeras boquillas se centraron en el canal en el punto donde comienza la deformación de la barra.
- No debe incidir perpendicularmente con la superficie del canal. Se escogió una inclinación de la boquilla en torno a los 30° en relación al radio del cilindro, permitiendo al agua fluir en régimen turbulento sobre el canal.
- El inicio de la refrigeración debe ser lo más cerca posible a la salida de la barra. El chorro de la primera boquilla incide a una distancia entre 30 y 100 mm de la salida de

la barra. En caso de que esta distancia sea mayor se deben instalar boquillas adicionales en las guías de salida.

5.3.2. Angulo de Cobertura de la Cinta:

Se decidió que debe variar de 90 a 120°. En caso de cilindros de acero rápido, que poseen una baja conductividad térmica, el ángulo de cobertura debe ser de 180°.

5.3.3. Sección Transversal de la Cinta:

La relación entre el área de sección transversal de la cinta y el área de las boquillas debe ser tal que mantenga el agua comprimida en el interior de la cinta y que asegure una expansión del chorro de agua a través de las boquillas. Se decidió usar unas boquillas de mínimo 5 mm de diámetro en la salida. Para que la relación sea igual o mayor a 3 la sección transversal debe ser mínimo de 15mm.

5.3.4. Distancia entre la Salida de la Boquilla y la Superficie del Canal:

Debe ser entre 20 y 30 mm. También depende del espacio disponible, sin embargo el diseño cuenta con un sistema de corredera para su correcta ubicación.

5.3.5. Materiales para la Cinta y Tubo de Entrada para la Refrigeración:

Por las condiciones de trabajo, se pueden usar los siguientes materiales para la fabricación de las cintas:

- Acero al carbono
- Acero inoxidable
- Aluminio (pesa aproximadamente 1/3 de la cinta en acero)
- Polipropileno (pesa aproximadamente 1/5 de la cinta en acero)

5.3.6. Tubo de Entrada de Refrigeración (Sch40):

Los tubos de la tabla siguiente aseguran una pérdida mínima de carga.

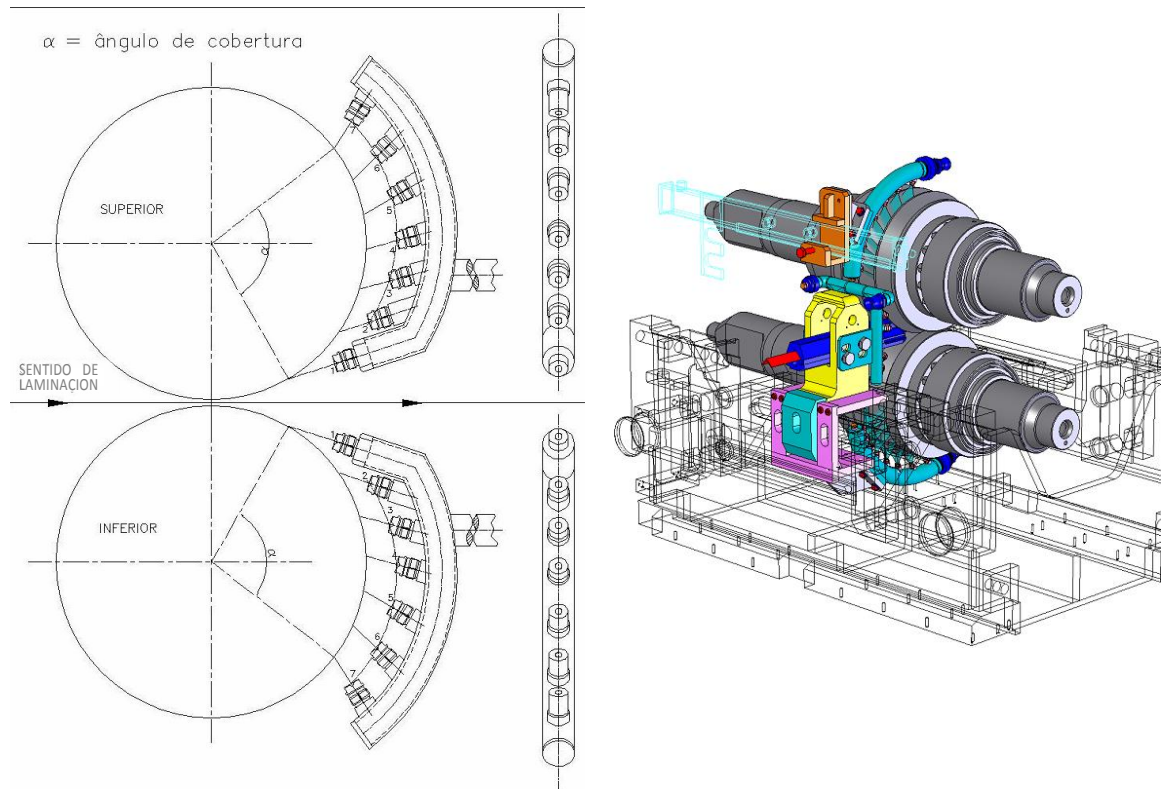
Tabla 30. *Tubos de refrigeración vs. Caudal:*

Caudal [m³/h]	Diámetro externo	Diámetro interno [mm]	Área [mm²]
10	1 1/4"	35.04	964
20	2"	52.51	2166
30	2"	52.51	2166
40	2"	52.51	2166
50	3"	77.92	4769
60	3"	77.92	4769
70	3"	77.92	4769

Fuente: Autor del proyecto

5.3.7. Diseño Esquemático de la Cinta de Refrigeración:

Figura 33. Diseño inicial esquemático de las cintas de enfriamiento



Fuente: Autor del proyecto

5.4. CARACTERISTICAS DEL AGUA DE REFRIGERACION

Para obtener unas condiciones óptimas de funcionamiento de las cintas, con ayuda de los ingenieros de proceso de Diaco, se decidió que el agua debe tener las siguientes características:

- Temperatura = 20 – 30°C
- pH = 8 – 8.5
- Concentración de iones cloruro < 50 ppm
- Concentración de iones sulfato < 100 ppm
- Sólidos en suspensión < 50 ppm
- Aceites < 10 ppm
- Mayor partícula sólida < 1 mm

Las anteriores condiciones serán controladas por los colaboradores de la planta. Se harán mediciones periódicas para mantener y asegurar la buena calidad del agua de enfriamiento.

5.4.1. Efectos Nocivos de las Sales y del aceite en las cintas:

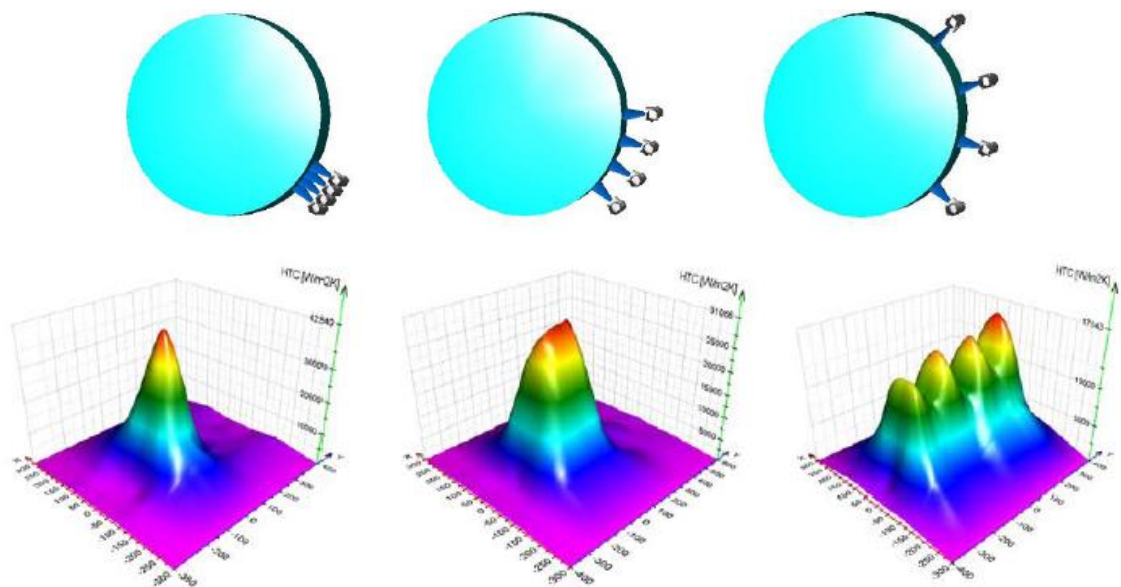
Los principales problemas que conllevaría no tener un control estricto en el agua de refrigeración son las siguientes:

- Por encima de los 300°C las sales se tornan corrosivas. En concentraciones elevadas atacan al aglutinante (principalmente cobalto) del metal duro dejando el canal poroso.
- El aceite forma una capa aislante sobre el canal, perjudicando la remoción de calor. Además deteriora el perfil de distribución de las gotas.
- El aceite aumenta el tamaño de las gotas, reduciendo el área de efecto del agua para la transferencia de calor.
- Las partículas y sedimentos disminuyen el ángulo del chorro de agua, reducen el caudal de los chorros y por tanto reducen el impacto.
- El aceite disminuye también la turbulencia del agua sobre el canal, reduciendo con esto la remoción del calor debido a su baja conductividad térmica y capacidad calorífica.

5.5. ANALISIS DE LOS DATOS

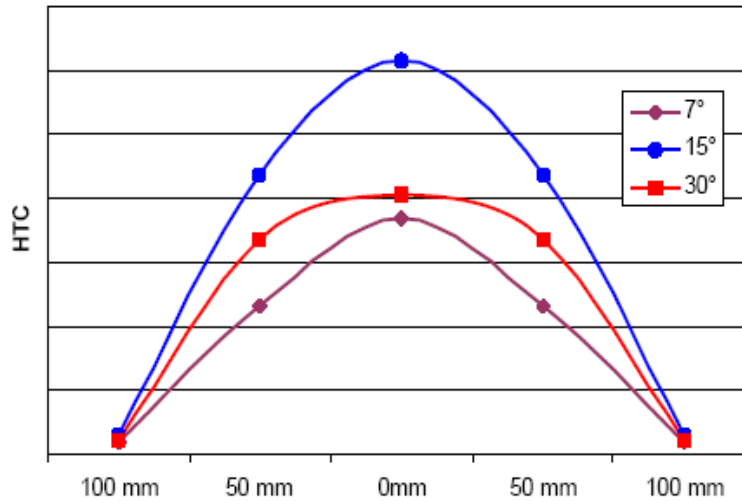
Con los datos obtenidos en el numeral anterior se analizaron las opciones de mejora teniendo en cuenta las variables que se puedan optimizar, los costos de aplicación, la viabilidad técnica y el porcentaje de mejora. A continuación se muestra una de las simulaciones para escoger la disposición final y cantidad de boquillas (Figura 34):

Figura 34. Espaciamiento entre los chorros de refrigeración




Fuente: Autor del proyecto, simulación en Solidworks

Figura 35. Curvas de Calor dispersado Vs Distancia de las boquillas



Fuente: Autor del proyecto, simulación en Solidworks

Tabla 31. Parámetros Obtenidos para el Diseño:

Parámetros dimensionales	
Ángulo de cobertura (α)	120°
Espaciamiento entre toberas	15°
Diámetro de tubo flauta	1 ¼"
Diámetro de tubo de entrada agua	2"
Ancho Cintas: Pasos 1 y 2 Pasos 3 y 4 Pasos 5 y 6 Pasos 7 y 8	>150 mm >100 mm >70 mm >60 mm
Boquillas <div style="text-align: center;">  <p>HH</p> <p>Cuerpo de una pieza 1/8" a 1" NPT o BSPT (M)</p> </div>	Se escogieron las boquillas de Aspersión de cono lleno, Veejet HH25, Sistemas de atomizadores, utilizados en refrigeración de cilindros Cd = 0,95.
Distancia desde la punta de las toberas hasta la superficie de la canal (en el sentido del chorro)	5 - 10 cm
Ángulo de inclinación de las toberas respecto de la perpendicular a la superficie del cilindro	35°

Relación de secciones equivalentes a la entrada y la salida del agua de refrigeración		$\geq 3:1$
Consideraciones especiales		
Canales anchos (Desbaste)		Utilizar mínimo dos distribuciones, lado a lado
Angulo de cobertura (α) para acero rápido		150° - 180°
Material		Acero inoxidable
Agua de refrigeración		
Desbaste	Caudal	300 l/min/canal
	Presión	3 bar
Intermedio	Caudal	240 l/min
	Presión	4 bar
Acabador	Caudal	220 l/min
	Presión	5 bar
Temperatura		$\leq 35^{\circ}\text{C}$. Si es mayor, se debe incrementar 20% el flujo por cada 5°C

Fuente: Autor del proyecto

Los planos del diseño final se relacionan a continuación:

Tabla 32. Relación de planos del Diseño de las Cintas de Enfriamiento:

ITEM	DESCRIPCIÓN	CODIGO DIACO	ANEXO
1	CINTAS DE ENFRIAMIENTO	DTU-00-T2-00T1 1/2	ANEXO 4
2	CONJUNTO GENERAL CINTAS	DTU-00-T2-00T1 1/2	ANEXO 5
3	FLAUTA DESPEJE CASCARILLA	DTU-00-T2-00AA	ANEXO 6

Fuente: Autor del proyecto

6. RECURSOS USADOS

6.1. RECURSOS FISICOS

6.1.1. Talento Humano:

<i>Director:</i>	Orlando Díaz Parra Ingeniero Mecánico Docente U.P.T.C. Facultad Seccional Duitama
<i>Coordinador:</i>	José Benito Barrera Carvajal Ingeniero Electromecánico U.P.T.C. Gerente de Laminación GERDAU DIACO Tuta
<i>Coordinación:</i>	Juan Carlos Sáenz Chaparro Ingeniero mecánico Universidad de América Facilitador de mejora Tren 2 planta GERDAU DIACO Tuta
<i>Proyectista:</i>	Edwin Arturo Zarabanda González Estudiante de Ingeniería Electromecánica U.P.T.C. Practicante universitario planta GERDAU DIACO Tuta

Tabla 33. Equipos, instalaciones, información y materiales

TIPO	RECURSO	UBICACION
EQUIPOS	Computadora de la empresa	Gerdau Diaco Tuta
	Computadora personal	Duitama
	Elementos y equipos de medición	Gerdau Diaco Tuta
INSTALACIONES	Planta Gerdau Diaco Tuta	Tuta
	Aulas y bibliotecas UPTC	Duitama, Tunja
INFORMACION	Libros guía de las bibliotecas de la UPTC	Duitama, Tunja
	Manuales, planos, guías técnicas y presentaciones otorgadas por los colaboradores con consentimiento de la empresa	Gerdau Diaco Tuta y plantas hermanas
	Internet e información recopilada a lo largo de la carrera	
MATERIALES	Cilindros de laminación, tuberías, aceros, agua	Gerdau Diaco Tuta

6.2. RECURSOS FINANCIEROS

Tabla 34. Recursos Financieros







CONCEPTO	VALOR (COP)
Papelería	\$250.000
Transporte	\$420.000
Adquisición de información (información, guías, libros, revistas)	\$1'200.000
Software	\$480.000
Materiales de escritorio	\$40.000
Imprevistos	\$700.000
Total	\$3'090.000

7. RESULTADOS OBTENIDOS

En el alcance del proyecto se especificó que no se incluía la construcción de las cintas por parte del autor. Sin embargo en la empresa Gerdau Diaco Tuta se implementó como parte de los proyectos de mejora continua por la viabilidad del diseño. Los resultados de su fabricación y montaje fueron los siguientes:

- ✓ Aumento de 10500 a 19400 Ton por cambio.
- ✓ Aumento en la vida útil del juego de cilindros, considerando el cambio + la vida de cada cilindro.
- ✓ Aumento de 2 campañas por juego.
- ✓ Producción total por juego de 126.000 a 271.600 Ton.
- ✓ Aumento de la vida útil del juego de 1,2 años a 2,2 años.
- ✓ Una reducción en el costo del cilindro del trío de \$1449,7 a \$743,5 COP/Ton.
- ✓ Reducción de la temperatura del cilindro de una media de 60°C a una media de 37°C.
- ✓ Gran diferencia en la inspección visual mensual de los canales (Tabla 35).

Tabla 35. Inspección visual de canales, antes y después del montaje de las cintas de enfriamiento diseñadas:

	CANAL 2	CANAL 3	CANAL 8
ANTES			
DESPUES			

Fuente: Autor del proyecto

- ✓ Disminución de las pérdidas de agua en las conexiones, pues se reemplazaron las mangueras de caucho por mangueras metálicas con conexiones fijas, seguras e inoxidables (Figura 36).

Figura 36. Nuevo montaje de manifolds y mangueras en la caja de desbaste



Fuente: Autor del proyecto

- ✓ Mínimo contacto del agua con la barra laminada, lo que implica que no hay pérdida excesiva de temperatura en la palanquilla y una mayor disipación de calor en el cilindro (Figura 37)

Figura 37. Cintas diseñadas montadas en la caja de desbaste:



Fuente: Autor del proyecto

Figura 38. Cintas diseñadas fabricadas



Fuente: Autor del proyecto

8. CONCLUSIONES

8.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- *Analizar el estado actual de la refrigeración de dicha caja para escoger la mejor opción de optimización.*

Los principales problemas encontrados en el sistema de refrigeración previo al diseño fueron:

- ✓ El posicionamiento de algunas flautas no permite que el agua alcance la parte más próxima a la salida de la barra. Este es el punto más crítico en refrigeración, pues se trata del punto en donde la temperatura es más alta, lo que con la refrigeración deficiente facilita la transmisión de calor por conducción al interior del cilindro.
 - ✓ La posición de la refrigeración del cilindro superior genera un efecto cascada que deja prácticamente sin agua la porción de cilindro adyacente a la salida de la barra.
 - ✓ Lo ideal es combinar ángulo de cobertura, forma y dirección de los chorros, distancia de la salida de los chorros hasta el cilindro y separación de los chorros entre sí, para lograr una cobertura total de la refrigeración del canal y una buena dispersión de calor con la misma cantidad de agua.
- *Diseñar un sistema, en base al análisis inicial, que optimice la refrigeración de los cilindros laminadores de la caja mencionada.*

Se consolidaron los datos y se escogió un plan viable, se realizaron los cálculos, simulaciones, y decisiones necesarias para obtener la mejor opción – económica y técnicamente – en el sistema de enfriamiento. Se tuvieron en cuenta tanto las bases técnicas obtenidas durante la carrera de Ingeniería electromecánica como la experiencia de los colaboradores de la empresa GERDAU DIACO (desde facilitadores hasta operarios) para escoger el mecanismo que cumple con los objetivos planteados.

- *Evaluar el sistema diseñado para verificar si cumple con los estándares de la empresa, los requerimientos de la universidad y si es viable técnica y económicamente.*

La utilización de este tipo de cintas de enfriamiento permite, teóricamente, que el agua llegue hasta el punto más próximo a la salida de la barra y admite imprimir además un ángulo de incidencia a los chorros para asegurar que el agua permanezca en el canal refrigerado sin que haya ‘rebote’ hacia la parte exterior de las cajas. Se cumplieron los estándares técnicos, de materiales y ecológicos de la empresa Gerdau Diaco en el diseño, optando por un sistema de bajo costo en comparación con los beneficios a obtener, que

asegura la vida útil tanto de los cilindros como de sus mismos componentes. Los requerimientos de la universidad están implícitos en el desarrollo del trabajo.

8.2. OBJETIVO GENERAL

- *Optimizar el sistema de refrigeración de la caja 1 de desbaste del tren laminador 2 de la empresa GERDAU DIACO TUTA mediante el mejoramiento y/o rediseño de las flautas y boquillas aspersoras, la correcta distribución de las mismas y el control en la llegada de agua.*

Según el diseño es posible utilizar sólo el 15% del caudal necesario para la refrigeración de cilindros, en comparación con un 30% del total usado previamente al diseño. Para evitar desperdicios de agua, pérdidas de presión y de caudal, altos choques térmicos y taponamiento de boquillas se realizó una revisión exhaustiva de los sistemas de enfriamiento de las plantas hermanas, se compararon las más confiables y se mejoraron las falencias que se consideraron más importantes para obtener un enfriamiento eficiente de los cilindros sin afectar la temperatura de la barra laminada. Con esto se puede obtener una reducción de la temperatura de por lo menos 25°C (de 70 a 80 grados a una media de entre 45 a 50°C) en el punto de incidencia del agua, hasta un tope teórico de disminución de 150°C en el punto de temperatura máxima del cilindro (de 650°C se reduciría a 500°C).

Se cumplieron los requerimientos de mejora del sistema, se escogieron las opciones más asertivas, eficientes y eficaces, lo que demuestra que muchas veces no es necesario hacer grandes inversiones para obtener muy buenos resultados.

9. BIBLIOGRAFIA

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, Pilar. **Metodología de la Investigación**. Cuarta edición, Iztapalapa, México D.F., Ed Mc Graw Hill Interamericana, 2006.

BALLESTEROS, Melissa. MONTOYA, Mateo. **Historia del Acero en Colombia** {En Línea}, {Agosto 2015} Disponible en:
<https://macecol.jimdo.com/sector-sider%C3%BArgico-1/historia/>

ALEXANDRE MILANEZ. **Curso de laminação de barras laminadas redondas**. 2006. 156 págs. Universidade Federal do Rio Grande do Sur. Porto Alegre.

ENRIQUEZ, Salvador. **Historia de la Refrigeración** {En Línea}, {Diciembre 2015} Disponible en:
www.monografias.com/trabajos81/historia-refrigeracion/historia-refrigeracion.shtml#ixzz4ld8mGOEV

SCHRÖDER, Karl Heinrich, **Descripción Básica, de los Fundamentos Mecánicos de los Cilindros de Laminación**. Birmingham (Reino Unido), 2003. Disponible en:
http://www.brcil.com/downloads/spanish/mein_buch_es.pdf

ENRIQUEZ, José Luis. TREMPES, Enrique. DE ELÍO, Susana. FERNÁNDEZ, Daniel. **Laminación**. Madrid, 2010, 116 pág.

CENTELLES, Francisco. **Enfriamiento de Máquinas y Procesos** {En línea}. Octubre 2016. Disponible en:
<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5113-Enfriamiento-de-maquinas-y-de-procesos.html>

KOITI, Pedro. **LM517 - Cilindros, Anillos y Guías**. Escuela Técnica-Laminación. GERDAU. 2012.

SILVA, C.F.A. & Garcia, F.P. **Curso de Laminação e Calibração de Produtos Não Planos**. São Paulo: ABM, 1994. p. 412 a 429.

GUO, Y. B.; WEN, Q.; HORSTEMEYER, M. F.: **An Internal State Variable Plasticity Based Approach to Determine Dynamic Loading History Effects on Material Property in Manufacturing Processes**. International Journal of Mechanical Sciences: Elsevier, 2005. Volúmen 47.

DUAN, X.; SHEPPARD, T.: **The Influence of the Constitutive Equation on the Simulation of a Hot Rolling Process**. Journal of Materials Processing Technology: Elsevier, 2004. Volúmen 150.

SCHAEFFER, L. **Método de Medição de Força em Laminação**. Disertación de Mestría. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1976. 116 pág.

SHURIZLY, A.; LEONARD, J. G.: **The Effect of Scaling and Emulsion Delivery on Heat Transfer During the Hot Rolling of Steel Strips**. Diario de Tecnología de Procesamiento de Materiales: Elsevier, 2000. Volúmen 101, pg 250-259.

HERBERT Damm, Heinz. **REFRIGERAÇÃO DE CILINDROS DE LAMINAÇÃO (AÇOS LONGOS)**. São Caetano do Sul 2007. Pág. 76

MILANEZ, Alexandre. **Estudo da Calibração de Barras Chatas Laminadas a Quente em um Laminador Trio**. Porto Alegre, Brasil, 2006. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

NTC 1486 – Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Disponible en <http://www.ICONTEC.org/>

RAE, Diccionario de la Real Academia Española. Madrid, 14 de Octubre de 2014. Disponible en <http://lema.rae.es/drae/>

BROOKES, K.J.A. **World Directory and Handbook of Hardmetals and Materials**. 5. ed. Grã-Bretanha: International Carbide Data, 1992. p. 3 a 198.

CATALOG 70 – Industrial Spray Products – Spraying Systems Co {En línea}. Agosto 2014 Disponible en: <http://www.spray.com/>

POTTER, Merle. WIGGERT, David. **Mecánica de Fluidos**, 6ª edición. México, 2006. Ed. Pearson Education. 644 pág.

CENGEL, Yunus. BOLES, Michael. **Termodinámica**. 6ª edición. México, 2009. Ed. Mc Graw Hill. 1038 pág.

CENGEL, Yunus. **Transferencia de Calor**. 2ª edición. México, 2004. Ed. Mc Graw Hill. 798 pág.

KERN, Donald. **Procesos de Transferencia de Calor**. 31ª edición. México, 1999. Ed. Continental S.A. 976 pág.

KREITH, F. **Princípios de Transmissão de Calor**. 3ª edición. São Paulo, 2002. Ed Edgard Blücher 550 pág.

PLAUT, R.L. **Laminação dos Aços – Tópicos Avançados**. 3ª edición. São Paulo: ABM, 1987. p. 5 a 192.

WIKIPEDIA {En línea}, Disponible en <http://en.wikipedia.org/>

10.GLOSARIO

Buza: sinónimo de boquilla. Es usada para controlar la cantidad de fluido, velocidad, dirección, masa, forma y/o la presión de la corriente que sale del mismo. En la buza la velocidad del fluido aumenta sobre el gasto de su energía de presión.

Calamina: Conocida científicamente como hemimorfita, es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo sorosilicatos. Calamina en realidad no es un sinónimo, es el término que usaban los mineros para designar a la mezcla que aparecía frecuentemente de hemimorfita, smithsonita e hidrocincita, en la parte alta de las minas de cinc. Es un hidroxisilicato de cinc hidratado, con aspecto de cristales largos dispuestos en costras radiadas, normalmente blancas, pero es frecuente en costras masivas de tonalidades verdes o azul intenso. Fue denominado hemimorfita debido al desarrollo hemimórfico de sus cristales. Esta inusual forma de cristalización hace que los cristales terminen en caras desiguales.

Caliza: La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita (MgCO_3) y otros carbonatos.¹ También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican (a veces sensiblemente) el color y el grado de coherencia de la roca. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohs es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.

Coeficiente de fricción: es la relación adimensional entre la fuerza de fricción entre dos cuerpos y la fuerza normal los comprime. Los valores del coeficiente de fricción necesitan ser obtenidos en condiciones de conformación plástica y son afectados por el tipo de material del cilindro, la lubricación líquida, los óxidos presentes en la interfaz cilindro, por el material laminado y por la rugosidad de los cilindros.

Colada de Blooms: Bloom es la traducción de “palanquilla” al idioma inglés. Colada de blooms se refiere al proceso de solidificación del acero líquido, sin ningún tipo de reducción posterior.

Coquilla: Es un molde metálico usado para la fundición de piezas. Como es metálico se puede reutilizar muchas veces. Las ventajas de la fundición con moldes permanentes incluyen buen acabado de la superficie y control dimensional más preciso. La solidificación más rápida ocasionada por el molde metálico da como resultado una estructura de grano más fino, por lo que se producen piezas fundidas más resistentes, es decir, de mejores propiedades mecánicas.

Desgaste: Se define como el daño de una superficie sólida, comprendiendo generalmente pérdida progresiva de material, que se debe al movimiento relativo entre la superficie y otra

superficie de contacto o en relación a una substancia. Existe el desgaste abrasivo, que es causado por partículas o protuberancias duras forzadas contra y moviéndose a lo largo de una superficie sólida. Las partículas son consideradas duras en cuanto tienen dureza al menos 1,2 veces superior a la del material desgastado. También se presenta el desgaste por deslizamiento, que designa el desgaste entre cuerpos que se deslizan uno contra el otro sin la presencia inicial de abrasivos entre ellos.

Dureza Rockwell: (ensayo de dureza Rockwell) es un método para determinar la resistencia de un material a ser penetrado. Constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación. Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido) y un penetrador cónico de diamante, el cual se utiliza para los materiales más duros.

El ensayo consiste en disponer un material con una superficie plana en la base de la máquina. Se le aplica una precarga menor de 10 kg, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica durante unos 15 segundos una fuerza que varía desde 60 a 150 kgf a compresión. Se quita la carga y mediante un durómetro Rockwell se obtiene el valor de la dureza directamente en la pantalla, el cual varía de forma proporcional con el tipo de material que se utilice. También se puede encontrar la profundidad de la penetración con los valores obtenidos del durómetro si se conoce el material.

Las durezas Rockwell y Rockwell Superficial vienen dadas por la siguiente fórmula:

$$nHRX$$

Dónde:

n = valor de dureza obtenido

HR = identificador del ensayo Rockwell

X = va a continuación de “*HR*” y es la letra correspondiente a la Escala usada:

- Para materiales muy duros, se emplea un cono con punta de diamante de 120 ° y una carga de 60 kg, y se simboliza HRA.
- Para aceros de baja resistencia se emplea una bola de acero extraduro de 1/16" y una carga de 100 kg, se simboliza HRB.
- Para aceros de alta resistencia se emplea un cono con punta de diamante de 120 ° y una carga de 150 kg, y se simboliza HRC

Escala Mohs: Es una relación de diez minerales ordenados por su dureza, de menor a mayor. Se utiliza como referencia de la dureza de una sustancia. Fue propuesta por el geólogo

alemán Friedrich Mohs en 1825 y se basa en el principio de que una sustancia cualquiera puede rayar a otras más blandas, sin que suceda lo contrario.

Mohs eligió diez minerales, a los que asignó un determinado número equiparable a su grado de dureza, estableciendo así una escala creciente. Empezó por el talco, que recibió el número 1, y terminó con el diamante, al que asignó el número 10. Cada mineral raya a los que tienen asignado un número inferior a él, y lo rayan aquellos que tienen un número superior al suyo.

Escala Shore: Se basa en la reacción elástica del material cuando dejamos caer sobre él un material más duro. Si el material es blando absorbe la energía del choque, si el material es duro produce un rebote cuya altura se mide.

La práctica se realiza en un "esclerómetro" o "escleroscopio", aparato formado por un tubo de cristal de 300 mm de altura, por cuyo interior cae un martillo con punta de diamante redondeada de 2,36 g. La altura de la caída es de 254 mm y la escala está dividida en 140 divisiones.

Tabla 36. Tabla de Dureza Escala Mohs

Dureza	Mineral	Se raya con / raya a
1	Talco	Se puede rayar fácilmente con la uña
2	Yeso	Se puede rayar con la uña con más dificultad
3	Calcita	Se puede rayar con una moneda de cobre
4	Fluorita	Se puede rayar con un cuchillo de acero
5	Apatito	Se puede rayar difícilmente con un cuchillo
6	Ortosa	Se puede rayar con una lija para el acero
7	Cuarzo	Raya el vidrio
8	Topacio	Rayado por herramientas de carburo de wolframio
9	Corindón	Rayado por herramientas de carburo de silicio
10	Diamante	El material más duro en esta escala (rayado por otro diamante).

Escorificante: Agente que reacciona con las impurezas generadas en la fundición de metales para formar escoria. Generalmente es la cal.

Ferrería: La ferrería era una antigua instalación siderúrgica en la que se transformaba el mineral de hierro en metal. Su existencia se remonta a la prehistoria y dejaron de funcionar con la aparición de los altos hornos en los albores del siglo XX.

La transformación del mineral de hierro en metal de hierro se realiza en un horno bajo en donde se van alternando capas de mineral, material fundente y un combustible normalmente carbón vegetal. Esta masa es calentada mediante la inyección de aire proveniente de algún artilugio de soplado, normalmente fuelles, pistones o dispositivos de Efecto Venturi. La masa alcanza una temperatura de entre 800 y 1.200°C y se mantenía allí en esas condiciones durante varios días. Pasado este tiempo se sacaba y mediante golpes se iba despojando de la escoria e integrando el hierro. Esta función se realiza mediante un gran martillo o mazo que suele ser movido hidráulicamente, una vez conseguido el metal de hierro se le daba una forma determinada para, posteriormente, trabajarlo en la herrería o en la forja.

Ferroaleaciones: Son conocidas como aquellas aleaciones de hierro que poseen un elemento constitutivo además del carbón. Por lo general son de suma utilidad para mejorar las propiedades de algunos elementos como el acero.

Las ferroaleaciones más conocidas son las de silicio, magnesio y cromo, se caracterizan por sus propiedades, entre las cuales se destacan:

- Resistencia a la corrosión
- Contrarrestar los efectos del azufre.

Cuando se realiza desoxidación de la fundición estas se mezclan con magnesio, calcio, vanadio, boro, cobalto, fósforo, níquel, titanio, entre otros.

Flauta: Tubo metálico con aberturas o boquillas que es utilizado principalmente en la refrigeración de la maquinaria.

Fricción: es la fuerza tangencial a la interfaz común entre dos cuerpos cuando, sobre la acción de una fuerza externa, uno de los cuerpos se mueve o tiende a moverse en relación a la superficie del otro. La palabra fricción es también usada para denominar la energía disipada en la interfaz entre cuerpos en movimiento o con tendencia al movimiento.³⁰

Heliaceración: Proceso consistente en la torsión de un material de baja resistencia para obtener un incremento en dicha resistencia.

Hematita: Conocido también como oligisto, es un mineral compuesto de óxido férrico, cuya fórmula es Fe_2O_3 y constituye una importante mena de hierro ya que en estado puro contiene un 70% de este metal. A veces posee trazas de titanio (Ti), aluminio (Al), manganeso (Mn) y agua (H_2O). Es el polimorfo α de Fe_3O_4 , la magnetita.

³⁰ JAU, Peter. **Metals Handbook, Friction, Lubrication and Wear**, volumen 18. Ed. ASM International. 1992. Pág. 42.

Muñón: Cuello del cilindro de laminación donde se ubican los rodamientos, bujes, etc. Generalmente tiene mucho menor diámetro que el cilindro y su acabado superficial es superior porque aloja los cojinetes para la alineación de la revoluciones.

Palanquilla: Se le llama así al lingote de acero recién hecho, que todavía está en la forma de una barra de metal o un rectángulo.

11. ANEXOS

Tabla 37. Relación de Anexos del Trabajo:

ITEM	DESCRIPCIÓN	AUTOR	ANEXO
1	INFORME DE CALIDAD DEL AGUA	IDEAM	ANEXO 1
2	RUTA DE AGUA A C1	E. ZARABANDA - GERDAU	ANEXO 2
3	TRAZADO CIL TABLA 1500 C1	GERDAU DIACO	ANEXO 3
4	CINTAS DE ENFRIAMIENTO	E. ZARABANDA	ANEXO 4
5	CONJUNTO GENERAL CINTAS	E. ZARABANDA	ANEXO 5
6	FLAUTA DESPEJE CASCARILLA	E. ZARABANDA	ANEXO 6

Fuente: Autor del proyecto